

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Željko Radman

Zagreb, 2015

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Krešimir Grilec, dipl. ing.

Student:

Željko Radman

Zagreb, 2015



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ŽELJKO RADMAN** Mat. br.: 0035172578

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **TROŠENJE KOTAČA TRAIČNIČKIH VOZILA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WEAR OF RAIL VEHICLE WHEELS**

Opis zadatka:

Tribosustav kotač/tračnica je tipičan primjer kotrljajućeg trošenja. Kolni slog tračničkog vozila čine dva kotača povezanih osovinom. Kotač iz jednog dijela ili monoblok kotač ima neke prednosti u odnosu na kotač s obručem, ali je njegovo trošenje znatno veće.

U ovom radu je potrebno:

- 1) Opisati pojavu trenja te navesti mehanizme trošenja.
- 2) Opisati tribosustav kotač/tračnica.
- 3) Pronaći primjer trošenja vijenca kotača tračničkog vozila.
- 4) Analizirati tragove trošenja.
- 5) Provesti prateća ispitivanja i dati zaključak.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Zadatak zadao:

I. Grilec
Izv.prof.dr.sc. Krešimir Grilec

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Cajner
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem svom mentoru dr. sc. Krešimiru Grilecu na strpljenju, vodstvu i korisnim savjetima pri izradi ovog rada, tehničkom suradniku Ivanu Vovku na nesebičnoj pomoći prilikom samog ispitivanja te kolegama na Katedri za materijale i tribologiju.

Također bih se htio zahvaliti TŽV Gredelju d.o.o i dip. inž. Damiru Burazinu koji su mi izašli u susret prilikom izrade ovog rada i nabave samog uzroka.

Na kraju se zahvaljujem svim profesorima i kolegama, koje sam upoznao tijekom studiranja, te posebno svojoj obitelji, ocu Markanu, majci Ljerki te bratu Mariju na bezuvjetnoj potpori i razumijevanju tijekom studiranja, kojoj je i posvećen ovaj rad.

Željko Radman

U Zagrebu, 17. srpanj 2015.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	VI
1. UVOD.....	12
2. TRENJE.....	13
2.1. Fizika trenja.....	14
2.2. Mehanizmi trenja	15
2.3. Vrsta trenja	16
2.3.1. Statičko i dinamičko trenje	17
2.3.2. Trenje kotrljanja.....	19
2.3.3. Trenje klizanja.....	22
3. ADHEZIJA I KOEFICIJENT ADHEZIJE.....	25
4. MEHANIZMI TROŠENJA MATERIJALA	27
4.1. Adhezijsko trošenje.....	27
5. OSOVINSKI SKLOP	32
5.1. Kotači kod željezničkih vozila	33
5.1.1. Kotači s obručem	33
5.1.1.1. Kotači s gumenim elementima.....	35
5.1.2. Monoblok kotač	38
5.1.2.1. Profil oboda monoblok kotača	39
5.1.2.2. Vijenac monoblok kotača.....	40
6. UTJECAJ TOPLINSKE OBRADJE NA SVOJSTVA KOTAČA	42
7. OPĆENITO O DODIRU KOTAČA I TRAČNICE	43
7.1. Hercova teorija	45
8. MEHANIZAM TROŠENJA VIJENCA MONOBLOK KOTAČA I POVRŠINE KOTRLJANJA.....	46

8.1.	Sile u točki dodira kotača i tračnice i posljedice trošenja vijenca	47
8.1.1.	Trošenje vijenca kotača pri prolasku kroz zavoj bez klizanja	50
8.1.2.	Trošenje vijenca kotača pri prolasku kroz zavoj s klizanjem	51
8.1.3.	Utjecaj geometrije dodira na trošenje vijenca kotača	52
8.1.4.	Trošenje vijenca kotača pri promijeni širine kolosijeka.	55
9.	PROVJERA ISTROŠENOSTI VIJENCA I PROFILA KOTAČA.....	57
9.1.	Norma UIC 510 - 2	57
9.2.	Mjerka za vijenac monoblok kotača	59
9.3.	Provjera nagiba vijenca.....	60
10.	TRAJNOST DIJELOVA KONSTRUKCIJE.....	61
10.1.	Alternativne metode smanjenja trošenja vijenca i profila kotača	62
10.1.1.	Podmazivanje vijenca i glave monoblok kotača	62
10.1.2.	Tokarenje vijenca i glave monoblok kotača	64
11.	VICKERSOVA TVRDOĆA	68
12.	EKSPERIMENTALNI DIO	72
12.1.	Uvod.....	72
12.2.	Plan eksperimenta	72
12.3.	Provedba pokusa	73
12.3.1.	Izrezivanje uzorka	73
12.3.2.	Priprema uzorka	75
12.3.3.	Određivanje kemijskog sastava uzorka.....	76
12.3.4.	Mjerenje tvrdoće	79
12.3.4.1.	Ispitni uzorak.....	79
12.3.4.2.	Mjerni uređaj	79
12.3.4.3.	Rezultati mjerenja tvrdoće po Vickersu	83
12.3.5.	Određivanje mikrostrukture	85
12.3.6.	Određivanje vrste materijala pomoću programskog paketa „CES EduPack“	92
13.	ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA.....	93
14.	ZAKLJUČAK.....	95
15.	LITERATURA	97

POPIS SLIKA

Slika 1.	Lokalni kontakti strojno obrađenih površina.....	15
Slika 2.	Djelovanja sila na tijelo za vrijeme statičkog mirovanja	16
Slika 3.	Djelovanja sila na tijelo za vrijeme gibanja	18
Slika 4.	Trenje kotrljanja	20
Slika 5.	Trenje klizanja	22
Slika 6.	Faze procesa klizanja.....	22
Slika 7.	Dijagram promjene sile trenja prije i nakon početka djelovanja vučne sile.....	23
Slika 8.	Krivulja srednje vrijednosti koeficijenta adhezije u ovisnosti o brzini gibanja vlaka	24
Slika 9.	Mehanizam adhezijskog trošenja	27
Slika 10.	Osovinski sklop	31
Slika 11.	Kotač s obručem.....	33
Slika 12.	Kotač s gumenim elementima	34
Slika 13.	Kotač s gumenim umecima	35
Slika 14.	Vrsta kotača s gumenim umecima.....	36
Slika 15.	Monoblok kotač.....	37
Slika 16.	Poprečni presjek monoblok kotača.....	38
Slika 17.	Različite izvedbe kotača s vijencima i primjena	39
Slika 18.	Kotač prije samog procesa hlađenja	41
Slika 19.	Promjena dimenzija i oblika kotača kao posljedica trošenja.....	42
Slika 20.	Kontakt i trenje između kotača i tračnice	43
Slika 21.	Otisak dodira kotača na tračnicu	44
Slika 22.	Granične veličine profila vijenca monoblok kotača.....	46
Slika 23.	Sile u točki dodira kotača i tračnica	47
Slika 24.	Veličine koje su u funkciji geometrije dodira	48
Slika 25.	Sile pri prolazu kroz zavoj bez klizanja	49
Slika 26.	Uzdužne sile pri prolasku kroz zavoj s klizanjem.....	50
Slika 27.	Utjecaj geometrije dodira na trošenje vijenca Δr_{12}	51
Slika 28.	Utjecaj geometrije dodira na bočne komponente sila dodira trenja, a - konični profil, b – nekonični profil	53

Slika 29.	Različite širine kolosijeka u svijetu.....	54
Slika 30.	Porast bočnih sila kao posljedica porasta širine kolosijeka.....	55
Slika 31.	Mjerka za kontrolu vijenca i profila kotača	56
Slika 32.	Mjerenje dimenzija profila kotača s punim i stisnutim vijencem pomoću mjerke.	58
Slika 33.	Provjera nagiba vijenca kotača pomoću QR mjerke	59
Slika 34.	Dijagram usporedbe naprezanja i zamora kod novih kotača u odnosu na rabljene kotače ovisno o primjenjivosti naprezanja i snazi vučnog vozila	60
Slika 35.	Podmazivanje vijenca kotača pomoću FluiLub sustava.....	61
Slika 36.	Podmazan (lijevo) i nepodmazan (desno) vijenac kotača	62
Slika 37.	Razlika direktnog i indirektnog podmazivanja	62
Slika 38.	Usporedba zadanog profila i varijante.....	63
Slika 39.	Glavna opslužna ploča.....	64
Slika 40.	Obrada profila kotrljanja i vijenca monoblok kotača pomoću portalnog tokarskog stroja PN 190 NSH	65
Slika 41.	Profil s minimalno dopuštenim promjerom usljed posljednjeg reprofiliranja	66
Slika 42.	Prikaz izbora kuta od 136°	67
Slika 43.	Utiskivanje Vickersovog indentora i izgled otiska.....	67
Slika 44.	Geometrija Vickersove piramide i mogući oblici otiska nakon rasterećenja	68
Slika 45.	Monoblok kotača s istrošenim vijencem	72
Slika 46.	Deformacija lista monoblok kotača u području lista prilikom izrezivanja uzroka.	73
Slika 47.	Izrezani vijenac monoblok kotača	73
Slika 48.	Zaliveni uzorak.....	74
Slika 49.	Unutrašnjost uređaja GDS 850, Leco	75
Slika 50.	Mehanizam pobude atoma uzorka kod GD – OES analize	76
Slika 51.	Shematski prikaz spektrometra u GD – OES uređaju	76
Slika 52.	Tvrdomjer Zwick.....	79
Slika 53.	Tablica za očitavanje tvrdoće po Vickersu za opterećenje utegom od 200 g.....	81
Slika 54.	Nagrizanje priprema u Nitlu.....	84
Slika 55.	Ispitivanje mikrostrukture na invertnom mikroskopu OLYMPUS serije GX51 ..	85
Slika 56.	Nagrižen rub, 1000x	86
Slika 57.	Nagrižen rub, 500x	86

Slika 58.	Nagrižen rub, 200x	87
Slika 59.	Nagrižen rub, 100x	87
Slika 60.	Nagrižen rub, 50x	88
Slika 61.	Nagrižena sredina, 1000x	88
Slika 62.	Nagrižena sredina, 500x	89
Slika 63.	Nagrižena sredina, 200x	89
Slika 64.	Nagrižena sredina, 100x	90
Slika 65.	Nagrižena sredina, 50x	90
Slika 66.	Lijevo koji ispunjavaju postavljene zahtjeve	91
Slika 67.	Dijagram analize vrijednosti izmjerene tvrdoće za sredinu uzorka	92
Slika 68.	Dijagram analize vrijednosti izmjerene tvrdoće za rub uzorka	93

POPIS TABLICA

Tablica 1. Faktor maksimalnog statičkog i dinamičkog trenja klizanja za različite vrste materijala	17
Tablica 2. Tipične vrijednosti konstante trošenja (k) parova materijala i njeno sniženje sa stupnjem podmazivanja	28
Tablica 3. Mjere za kotače i osovinski sklop na željezničkim vozilima	41
Tablica 4. Dodir kotača i tračnice u zavisnosti od istrošenosti	45
Tablica 5. Vrijednost nominalnog i minimalnog promjera kotača.....	58
Tablica 6. Karakteristike portalnog tokarskog stroja za obradu profila kotrljanja i diskova PN 190 NSH	64
Tablica 7. Vrijednosti sila opterećivanja kod Vickersove metode	71
Tablica 8. Kemijski sastav materijala uzorka.....	78
Tablica 9. Osnovne karakteristike tvrdomjera	79
Tablica 10. Izmjerene vrijednosti dijagonala otiska za sredinu uzorka	83
Tablica 11. Vrijednosti tvrdoće po Vickersu za sredinu uzorka nakon očitovanja iz tablice za HV 0,2	83
Tablica 12. Izmjerne vrijednosti dijagonala otiska za rub uzorka.....	84
Tablica 13. Vrijednosti tvrdoće po Vickersu za rub uzorka nakon očitovanja iz tablice za HV 0,2	85

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_0	mm^2	Nominalna dodirna površina
A_r	mm^2	Stvarna dodirna površina
A_r^i	mm^2	Jedinična dodirna površina
A_n	mm^2	Nazivna dodirna površina
A_s	mm^2	Stvarna površina dodira
D_V	mm	Debljina vijenca kotača
D_R	mm	Promjer pogonskog kotača
D	mm	Put klizanja
d	mm	Promjer osovine
d_1	mm	Vrijednost dijagonale utiska otisnutog penetratorom
d_2	mm	Vrijednost dijagonale utiska otisnutog penetratorom
e	N	Pomak rezultantne sile u odnosu na os kotača
F_{tr}	N	Sila trenja
F_V	N	Vučna sila
$ F_N $	N	Intenzitet normalne sile
$\sum F_1$	N	Otpor na elastičnu deformaciju
$\sum F_2$	N	Otpor na plastičnu deformaciju
$\sum F_2$	N	Otpor na brazdanje
$\sum F_2$	N	Otpor na kidanje adhezijskih sila
F_G	N	Težina kotača
F_{ob}	N	Vučna sila vozila na obodu pogonskih kotača
$F_{kotr.}$	N	Sila kotrljanja
g	m^2/s	Gravitacijska konstanta
G	N	Ukupna težina
G_a	kg	Adhezijska masa vozila
H	MPa	Tvrdoća
HV	MPa	Tvdoća po Vickersu
k_a	1/MPa	Konstanta trošenja

m_a	kg	Adhezijska masa
M_{kotr}		Moment kotrljanja
n		Broj jediničnih dodira
N_{D2}	mm ²	Normalna reakcija u točki D2
p_{max}	MPa	Maksimalni tlak u središtu dodirne površine
P	Pa	Površinski pritisak
Q_I	N	Opterećenje po točki
q_R	N	Mjera nagiba i polumjera korijena vijenca kotača
R	N	Rezultantna sila
r	mm	Polumjer kotača
R_e	N/mm ²	Granica tečenja
S	mm ²	Površina šuplje piramide otisnute u materijal
TR	N	Trošenje pri klizanju
W	N	Primjenjeno opterećenje
V_V	mm ³	Visina vijenca kotača
V_{loss}	mm ³	Volumetrijski gubitak uzorka
μ_{sp}		Specifična brzina trošenja
μ		Faktor trenja
$\mu_{kl,st}$		Faktor statičkog trenja klizanja
$\mu_{kl,din}$		Faktor dinamičkog trenja klizanja
$\mu_{kl,st,Max}$		Maksimalna vrijednost faktora statičkog trenja klizanja
μ_{kotr}		Faktor trenja kotrljanja
$\mu(v)$		Srednja vrijednost koeficijenta adhezije
σ	N/mm ²	Standardna devijacija površinskih uzvišenja
ω		Kutna brzina
ζ	mm ²	Redukcijsko klizanje
Y_I	N/mm ²	Bočna komponenta
Y	N/mm ²	Rezultirajuća bočna reakcija
ψ		Koeficijent adhezije
x	mm	Udaljenost kod klizanja
$d_{V_{sr}}^2$	mm	Srednja vrijednost dvije izmjerene dijagonale baze otiska

Δ_{r_o}	mm	Smanjenje promjera kotača profiliranjem
$x_{r.u.}$	mm	Aritmetička sredina rezultata tvrdoće za rub uzorka
$x_{s.u.}$	mm	Aritmetička sredina rezultata tvrdoće za sredinu uzorka
$\sigma_{r.u.}$	mm	Varijanca rezultata tvrdoće za rub uzorka
$\sigma_{s.u.}$	mm	Varijanca rezultata tvrdoće za sredinu uzorka
β^*	mm	Duljina površinskih uzvišenja

SAŽETAK

Pri eksploataciji svih željezničkih vozila, neizbježan je prirodan proces habanja vijenca monobloka kotača i površine kotrljanja, koji je grubo rečeno rezultat trenja nastalim između monobloka kotača u dodiru sa tračnicom i papučom za kočenje.

U ovom radu definirano je trenje kao pojava te objašnjena sama fizika trenja. Također je opisan mehanizam trenja i trošenja, pri čemu se posebno ističe trenje kotrljanja kao najčešći mehanizam trošenja uz kombinaciju s klizanjem (adhezijom).

Opisan je sam tribosustav kotač/tračnica te provedena usporedba kotača s obručem i kotača iz jednog dijela (monoblok). Posebna pozornost je usmjerena na sam vijenac monoblok kotača koji je sastavni dio strukture kotača i koji sprečava iskliznuće iz tračnice pri čemu je posebice izložen trošenju i naprezanjima prilikom voženje u zavoju.

Navedene su i opisane metode provjere isotrošenosti vijenca i profila kotača, opisane su alternativne metode smanjenja njihovog trošenja, odnosno habanja te je opisana je metoda određivanja tvrdoće po Vickersu, kao važan faktor pri samom sučelju kotač/ tračnica.

Eksperimentalni dio se sastojao od nabave uzorka kotača, pri čemu je provedena priprema uzorka, nakon čega je izmjerena tvrdoća po Vickersu za rub uzoraka kako bi se utvrdila razlika tvrdoće u dijelu vijenca i glave kotača kao posljedica toplinske obrade kotača i samog trošenja. Nakon toga je određen kemijski sastav, te ispitana mikrostruktura.

Na kraju je provedena analiza na osnovu dobivenih rezultata i analiza pri čemu je određena vrsta materijala samog ispitnog uzorka uporabom programskog paketa za izbor materijala (CES EduPack 2009) na osnovu dobivenih rezultata te na osnovu toga donesen zaključak.

INTRODUCTION

In the exploitation of all the rolling stock, inevitable is the natural process of wear at the flange of the monoblock wheels and rolling surface, which is roughly a result of the friction occurring between the monoblock wheels in contact with the rail and the brake.

In this work, friction is defined and the occurrence of physics of friction is explained. The mechanism of friction and wear is also described, in which particularly emphasizes rolling friction as the most common mechanism of wear in combination with sliding (adhesion).

The tribosystem wheel/rail himself is described and the comparison between wheel with rim and wheel from one part (monoblock) is made. Special attention is directed to the flange of the monoblock wheel which is an integral part of the structure of the wheel and which provides the wheel from slipping of the rail where it is particularly exposed to wear and stress in curves.

There are listed and described verification methods of wear flange and wheel profile, and also alternative methods of reducing their expenditure. Vickers method for measuring the hardness is described, and taken as an important factor of the wheel / rail interface.

The experimental part was made of the purchase of a wheel flange sample, where the sample preparation was carried out, after the measuring of the Vickers hardness at the edge and in the middle of the sample to determine the difference of the hardness at the flange of the wheel and at the body of the wheel as a result of the heat treatment and wheel wear. After that the chemical composition was determined and microstructure examined.

In the end, an analysis was made based on the results of the hardness and the microstructure to determine the material of the test specimen by using an engineering program for selecting materials (CES EduPack 2009) based on the given results and based on that adopted a conclusion.

1. UVOD

Zahtjevi za brzim, efikasnijim i udobnijim prijevozom doveli su do razvoja željezničkih vozila. Analogno tom razvoju kretao se i razvoj kotača željezničkog vozila (lokomotiva i vagona). Razlikujemo dvije vrste kotača i to monoblok kotač (kotač izrađen iz jednog dijela – kompaktan) i kotači sa navučenim obručem. Svi proizvođači dužni su se pridržavati zakonskih normi i objava UIC (Međunarodna željeznička unija), koje definiraju parametre i uvjete izrade kotača željezničkih vozila.

Kako je predmet ovog rada analiza trošenja kotača tokom eksploatacije potrebno je prvo identificirati one koji se danas najviše koriste u upotrebi, te identificirati utjecajne faktore koji najčešće utječu na trošenje. Analizirajući problematiku trošenja, kao najuticajniji faktori mogu se definirati oni koji su zavisni od uvjeta eksploatacije, materijala, toplinske obrade i, te uvjeta okoline. Za analizu je potrebno sagledavanje kompleksnosti utjecaja svakog od nabrojanih, a u cilju poduzimanja neophodnih koraka za svođenje trošenja na zadovoljavajuću mjeru, ne ugrožavajući sigurnost prometa. Početak razvoja željeznice vezan je za razvoj transporta rude u rudnicima Engleske na početku industrijske revolucije u XVIII stoljeću. Od tada se može smatrati i početak razvoja kotača kao osnovnog konstruktivnog dijela osovinskog sklopa, trčecog stroja željezničkih vozila. Kako je osovinski sklop jedan od najodgovornijih sklopova željezničkog vozila, to je i kotač kao element jedan od najznačajnijih. Poznato je da propisi i odredbe definiraju kompletan životni vijek kotača od projektiranja, izrade, ispitivanja, prijema iz proizvodnje, upotrebe, eksploatacije, održavanja do prijedloga za kasaciju i rashodovanje. Zato je potrebno tokom eksploatacije stalno kontroliranje trošenja istog sa poduzimanjem neophodnih mjera za sigurnost.

Prvi konstruktor George Stevenson je u pogonski stroj parne lokomotive ugradio kotač tako konstruiran da je do današnjeg dana zadržao svoje glavne karakteristike, a to su čvrst sklop sa osovinom (kolni slog), određeni oblik i dimenzije, karakterističan profil kotača sa vijencem i obodom, te kvalitetan materijal za izradu. U pogledu konstrukcije razvile su se dvije vrste kotača i to kotači s obručem, koji se sastoje od tijela kotača i na njega čvrsto navučen obruč osiguranog sa prstenom za pričvršćenje i monoblok kotači koji su izrađeni iz jednog komada sa obodom čiji profil odgovara profilu obruča [1] .

2. TRENJE

Prema definiciji trenje je sila koja se javlja na dodirnoj površini (kontaktnu) dvaju tijela pri gibanju jednog tijela po površini drugog tijela i koja otežava to gibanje (kinematička sila trenja) ili to gibanje sprečava (statička sila trenja) [2]. Djeluje paralelno s dodirnim površinama, a smjer joj je suprotan smjeru relativnog kretanja. Trenje djeluje tangencionalno na granicu između dva tijela, kada se pod djelovanjem vanjske sile, jedno tijelo kreće ili ima tendenciju relativnog kretanja u odnosu na površinu drugog tijela. Trenje predstavlja otpor što ga gibanju tijela pruža površina po kojoj se tijelo giba ili sredstvo kroz koje se giba i (premda neophodno za hodanje i gotovo sve oblike transporta na zemlji), kao pojava uzrokuje goleme gubitke energije.

Za ostvarenje relativnog gibanja između dodirnih ploha treba savladati silu. U većini slučajeva, u mnogobrojnim i različitim pokretnim elementima strojeva, uređaja i postrojenja, trenje je nepoželjna i štetna pojava. Na savladavanje sile trenja kao otpora kretanju bilo koje vrste troši se znatna količina mehaničke energije. Kao posljedica trenja na površinama u kontaktu dolazi do trošenja i zagrijavanja materijala površina. Utrošena mehanička energija prelazi u nepoželjnu i izgubljenu toplinsku energiju. Procjena je da se 10% potrošnje nafte koristi za savladavanje štetnog trenja. Razlikuje se:

- **Nekorisno (štetno) trenje i trošenje** - uzrokuje ogromne gubitke energije kod trenja i materijala kod trošenja;
- **Korisno trenje i trošenje** - potrebno je kod kliznih parova, obradbe materijala odvajanjem čestica, poliranja, transporta, kod kočenja ili bušenja, kod kotača za vožnju na vlakovima ili automobilima i dr.

Postavljaju se dva suprotna zahtjeva koja treba uskladiti u primjeni kao što su trajnost koja predstavlja otpornost na trošenje materijala i izbjegavanje štetnog trenja i trošenja, ali i tehnološkičnost koja predstavlja sposobnost oblikovanja materijala obradom, koja uključuje korisno trenje i trošenje. Poznavanje i razumijevanje principa tribologije omogućuje razumijevanje tribologije u industrijskoj primjeni.

Trošenje (habanje) predstavlja oštećenje površine ili odstranjenje materijala s jedne ili s obje od dvije čvrste površine koje su u kontaktu tijekom gibanja.

Kontrola trenja i trošenja je ključna kada se primjenjuju razni materijali, premazi i površinske predobrade (jedan od najučinkovitijih načina kontrole trenja i trošenja je ispravno podmazivanje). Maziva mogu biti kapljevine, čvrste tvari ili plinovi, koje osigurava izvođenje operacija bez teškoća i zadovoljavajuće trajanje strojnih elemenata [3].

2.1 Fizika trenja

Kada se dodirnu površine dva tijela javlja se trenje koje se protivi uzajamnom gibanju tijela. Sila trenja koja se mora savladati za uzajamno pomicanje tijela razmjerna je normalnoj sili kojom jedno tijelo djeluje na drugo, a neovisna je o površini (makrogeometrijskoj) dodira.

Vučna sila (F_v) je definirana kao sila kojom se vuče tijelo dok je sila trenja (F_{tr}) koja sprječava/usporava uzajamno gibanje tijela i uvijek ima suprotan smjer od vučne sile (1).

$$F_{tr} = \mu \cdot F_N \quad (1)$$

gdje je: $|F_N|$ – intenzitet normalne sile, N,

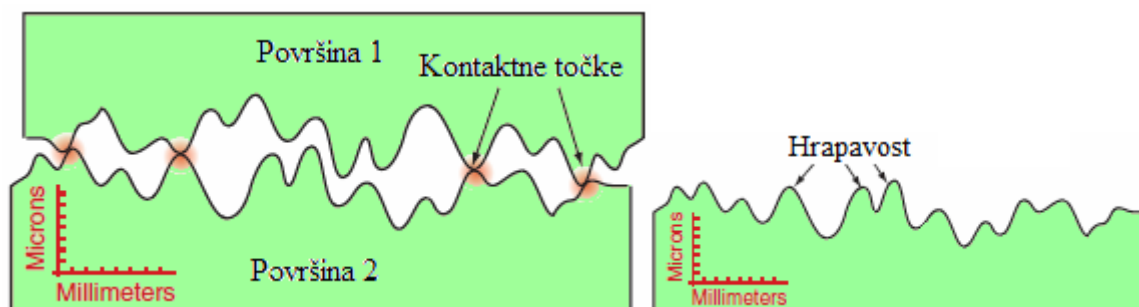
μ – faktor trenja.

2.2 Mehanizmi trenja

Hrapavost površine uzrokuje da do kontakta dolazi na diskretnim mjestima (asperities), gdje dolazi do međupovršinske adhezije, kada se inače glatke površine dovedu u kontakt.

Razlikuje se površinski dodir realnih (hrapavih) ravnih površina (konformni) i površinski dodir zakrivljenih ploha (nekonformni).

Stvarna dodirna površina proporcionalna je broju jediničnih dodira te opterećenju tj. normalnoj sili. Kod ravnih površina stvarna dodirna površina je manja od nominalne dodirne površine zbog neravnina – hrapavosti. Mikroanaliza otkriva da strojno obrađene površine nisu ravne, te se pri njihovom dodiru uspostavljaju lokalni kontakti (slika 1).



Slika 1. Lokalni kontakti strojno obrađenih površina

Na temelju mikroanalize dolazi se do zaključka da su stvarne površine dodira manje od nazivnih površina dodira te se nazivne površine dodira, zbog jednostavnosti, u mikro pristupu mogu zanemariti.

Tijekom uspostavljanja dodira ($a \Rightarrow b$), pri opterećivanju, dolazi do elastičnog i plastičnog deformiranja područja lokalnih kontakata (Slika 4).

Opterećenje se prenosi preko stvarne površine dodira (2):

$$F_n = A_s \cdot R_e \quad (2)$$

gdje je: R_e - granica tečenja, N/mm^2 ,

A_s - stvarna površina dodira, mm^2 .

Kod same interakcije kotač/tračnica radi se o kotrljanju s djelomičnim klizanjem[4].

2.3 Vrste trenja

Razlikuju se vrste trenja prema agregatnom stanju tijela u kontaktu kao što su trenje među čvrstim površinama (tzv. vanjsko trenje) i trenje među dijelovima fluida, odnosno između čvrstog tijela i fluida (tekućinsko trenje ili viskoznost). Vanjsko trenje se prema podmazivanju može podijeliti na suho trenje i trenje uz podmazivanje. Prilikom pokretanja tijela razlikujemo:

- **trenje mirovanja** (statičko trenje, trenje pokretanja) čija je najveća sila trenja koja prisiljava tijelo da još miruje;

- **trenje kretanja** (kinetičko, dinamičko trenje) čiju je silu potrebno savladati da bi se održalo stanje relativnog kretanja.

Kada se pokuša pomaknuti neko tijelo, ako je sila F kojom se vuče tijelo dovoljno mala, tijelo će mirovati. To znači da osim vučne sile F na tijelo djeluje neka druga sila koja uravnotežuje vučnu silu F . Dok tijelo miruje, sila trenja jednaka je po iznosu vučnoj sili F . Povećanjem sile F doseći će u jednom trenutku maksimalnu silu trenja i premašiti je, te će predmet početi ubrzavati u smjeru sile F . Najveća sila trenja koja prisiljava tijelo da još miruje je sila statičkog trenja. Kad vučna sila F nadmaši silu statičkog trenja, tijelo počinje klizati a sila koju je potrebno savladati da bi se održalo stanje relativnog kretanja zove se sila kinetičkog trenja.

Trenje kretanja je redovito manje od trenja pokretanja. Kod trenja postoje neka pravila koji neki nazivaju i zakonima trenja:

- 1. Trenje je neovisno o površini kontakta krutih tijela*
- 2. Sila trenja je proporcionalna normalnoj sili između površina*
- 3. Kinetičko trenje je gotovo neovisno o kliznoj brzini*

Tijekom interakcija između površina dolazi do djelovanja privlačnih sila, kao i prijenosa mehaničke energije, a time se mijenja fizikalna i kemijska priroda međudjelujućih površina materijala, uključujući i topografiju površine.

Interakcije do kojih dolazi na međupovršini (priroda interakcija i posljedice tih interakcija) određuju ponašanje međupovršine kod trenja, trošenja i podmazivanja, kao i ponašanje materijala u cjelini.

2.3.1 Statičko i dinamičko trenje

Prema prirodi gibanja razlikujemo, vrste trenja s obzirom na stanje gibanja (statičko i dinamičko) te vrstu trenja s obzirom na vrstu gibanja (klizanje i kotrljanje).

Statičko trenje, ‘static friction’, μ_s , odnosno statički faktor trenja nepomičnog uzorka predstavlja silu potrebnu da potakne gibanje (F), podijeljenu sa silom koja tlači zajedno dane dodirne ‘mating’ površine (N) (3):

$$\mu_k = F/N \quad (3)$$

Dinamičkog trenje, ‘dynamic friction’ (nazvano i kinematičko trenje ‘kinematic friction’) nastaje kod pokretnih uzoraka u gibanju. Dinamičko trenje, μ_k , odnosno dinamički faktor trenja, predstavlja silu (F), potrebnu da održi gibanje danih površina kod definirane brzine, podijeljenu sa silom koja tlači dodirne (mating) površine (N)(4) [3]:

$$\mu_k = F/N \quad (4)$$

Statičko trenje (neposredno prije pokretanja) je veće od dinamičkog trenja (u pokretu), a trenje klizanja je veće od trenja kotrljanja.

U tablici 1 su date maksimalne vrijednosti faktora statičkog trenja, naime:

- u odsutnosti vučne sile (5): $\mu_{kl,st} = 0$ (5)

- neposredno prije pokretanja tijela (6): $\mu_{kl,st} = \mu_{kl,st,Max}$ (6)

Tablica 1. Faktori maksimalnog statičkog i dinamičkog trenja klizanja za različite vrste materijala.

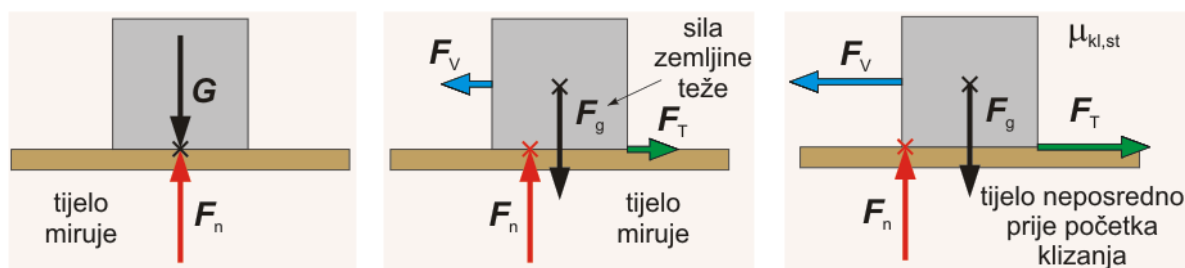
	$\mu_{kl,st,Max}$	$\mu_{kl,dn}$
drvo/drvo	0.5	0.3
čelik/čelik, bez maziva	0.15	0.09
čelik/čelik, s mazivom	0.03	0.03
guma/beton, suho	1.0	0.7
guma/beton, vlažno	0.30	0.25
čelik/teflon	0.04	0.04

Problemi trenja se u pravilu rješavaju makropristupom, to jest eksperimentalnim određivanjem faktora trenja za aktualne uvjete gibanja, na primjer: $\mu_{kl,st}$, $\mu_{kl,din}$.

gdje je: $\mu_{kl,st}$ – faktor statičkog trenja klizanja, 1,

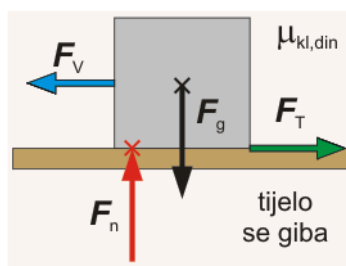
$\mu_{kl,din}$ – faktor dinamičkog trenja klizanja, 1.

Pri početnom rastu vučne sile (vlak) rastu u tijelu naprezanja sve do momenta savladavanja sile statičkog trenja (slika 2).



Slika 2. Djelovanja sile na tijelo za vrijeme statičkog mirovanja

Nakon pokretanja tijelo se nadalje giba uz savladavanje sile dinamičkog trenja (slika 3).



Slika 3. Djelovanja sile na tijelo za vrijeme gibanja [4]

Ubrzanje gibanja tijela (porast brzine u jedinici vremena) određuje rezultanta (7):

$$F = F_V - F_{tr} = m \cdot a \quad (7)$$

Tri ključne komponente trenja, treba uzeti u obzir pri proučavanju fenomena trenja, tj. uzroka i posljedica trenja:

- (1) **Adhezija** (međupovršinske veze tj. njihov tip i čvrstoću te prekid veza između tarnih materijala);
- (2) **Deformacija** (smicanje površina i prijenos energije tarnog para tj. plastičnu i elastičnu deformaciju, duktilnost i brazdanje);
- (3) **Kontaktna površina** (stvarno područje dodira, tj. hrapavost površina).

2.3.2. Trenje kotrljanja

Trenje kotrljanja je otpor što se pojavljuje pri kotrljanju kružnih ploča, kotača ili valjaka. Općenito vrijedi da je trenje kotrljanja mnogo manje nego trenje klizanja. Povećanjem broja prolaza kod kotrljanja smanjuje se sila trenja, F_t , jer se postupno smanjuje intenzivnost plastične deformacije, te se sila trenja sastoji samo od otpora elastičnim deformacijama i posebno je niska.

To je zato što uglavnom izostaju komponente sile trenja koje potječu od brazdanja, ΣF_3 i raskidanja adhezijskih veza, ΣF_4 .

Približno vrijedi (8):

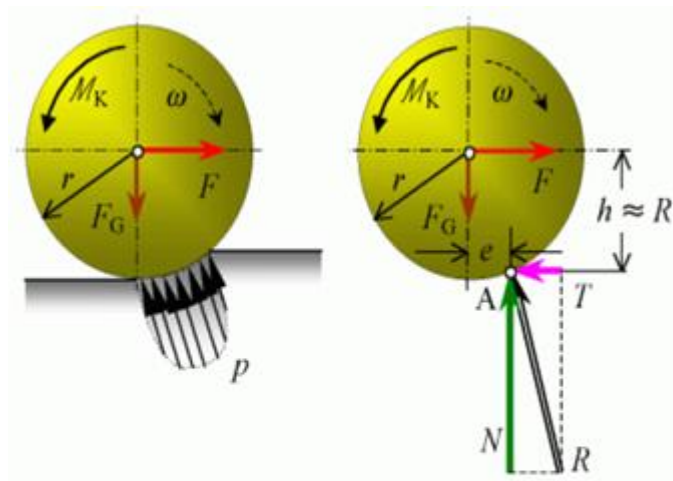
$$F_{tr} = \sum F_1 + \sum F_2 \quad (8)$$

gdje je

ΣF_1 - otpor na elastičnu deformaciju

ΣF_2 - otpor na plastičnu deformaciju [3]

Približna slika opterećenja krutog kotača što se kotrlja po deformabilnoj podlozi prikazana je na slici 4 gdje su:



- F – sila kotrljanja
- F_G – težina kotača
- F_{tr} – sila trenja
- R – rezultantna sila
- p – tlak
- r – polumjer kotača
- e – pomak rezultantne sile u odnosu na os kotača
- M_K – moment kotrljanja
- ω – kutna frekvencija

Slika 4. Trenje kotrljanja [2]

Izraz koji povezuje silu trenja i normalnu silu (težinu kotača) (9):

$$F_{tr} = \frac{e}{r} G = \mu_{kotr} G \quad (9)$$

Pri čemo $\mu_{kotr} = \frac{e}{r}$ je faktor kotrljanja i budući da je omjer između sile otpora i težine, pa je u tom smislu sličan faktoru statičkog i kinetičkog trenja. Veličina e ovisi o brojnim čimbenicima koje je vrlo teško kvantificirati, tako da potpuna teorija o otporu kotrljanja ne postoji u deciranom obliku.

Za koeficijent trenja se općenito uzima $\mu = 0,002$. Ova vrijednost sa gledišta iskustva može biti samo onda korištena, kada je podvožje u stalnom pogonu, odnosno mast za podmazivanje je tučena. Kod rijetko korištenih podvožja je udio za savijanje veći i, prema tome, trebalo bi se uzeti u vrijednosti $\mu = 0,003$.

Kod trenja kotrljanja razlikujemo očvrsnute i neočvrsnute kombinacije sučelja kotač/tračnica. Ako su oboje neočvrnuti strane $f = 0,5$ mm i kod očvrnutih dijelova može se uporišebiti $f = 0,3$ mm.

Otpor kretanju s obzirom na tračnice i trenje kotrljanja za pogonski kotač s vrijednostima

G – ukupna težina

R – resultantna sila

D_R – promjer pogonskog kotača

d – promjer osovine

f – koeficijent kotrljajućeg trenja

koeficijent trenja kotrljanja pri pritisku kotača (10):

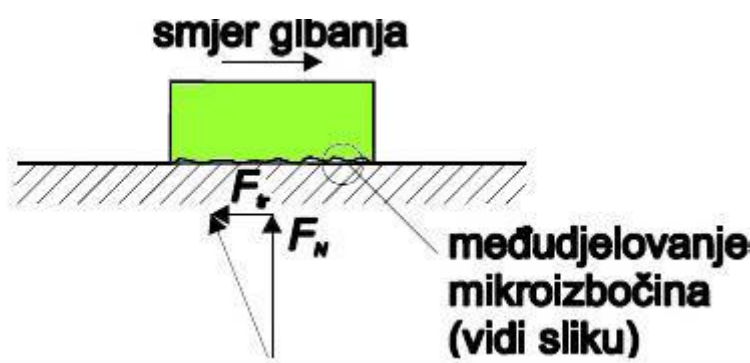
$$W = \frac{2R}{D_R \cdot \left(\frac{\mu \cdot d}{2 + f} \right)} \quad (10)$$

Uz vođenja pod utjecajem vijenca kotača povećao se otpor voženje za 20%. Za ukupni otpor voženje se pojedinačni otpori vožnje zbrajaju ili se iz ukupne težine G izračunava ukupni otpor vožnje (11) [5]:

$$W = \frac{2Gg}{D_R \cdot \left(\frac{\mu \cdot d}{2 + f} \right) \cdot 1.2} \quad (11)$$

2.3.3 Trenje klizanja

Trenje koje se javlja pri klizanju jednog tijela po površini drugog tijela je trenje klizanja. Trenje klizanja nastaje između dva elementa tribosustava, slika 5. Jedan zakon trenja kaže da je trenje neovisno o površini kontakta krutih tijela. Međutim stvarni dodir dviju površina razlikuje se od prividnog, geometrijskog.



Slika 5. Trenje klizanja [1]

Sila trenja kod klizanja predstavlja zbroj četiri komponente, koje su i same zbroj pojedinačnih komponenata i koje djeluju na svakom dodiru mikroizbočina materijala u kontaktu (12):

$$F_t = \sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4 \quad (12)$$

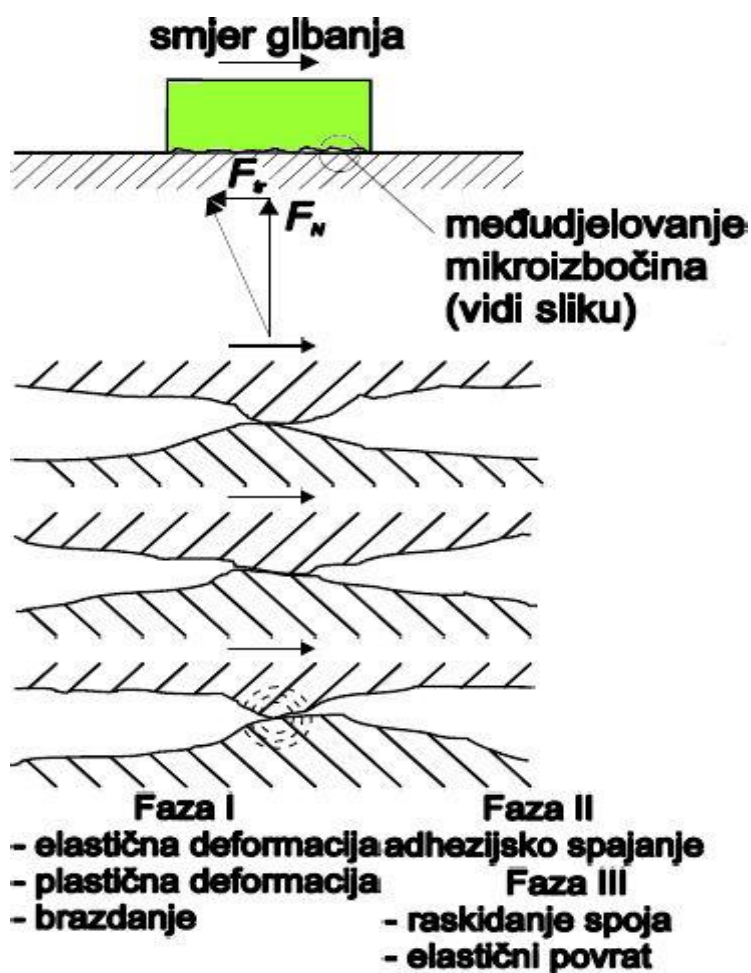
$\sum F_1$ - otpor na elastičnu deformaciju (proporcionalan modulima elastičnosti kliznog para);

$\sum F_2$ - otpor na plastičnu deformaciju (ovisi o granicama tečenja kliznog para);

$\sum F_3$ - otpor na brazdanje (ovisi o duktilnosti kliznog para i brzini relativnog gibanja);

$\sum F_4$ - otpor na kidanje adhezijskih veza (ovisi o jačini adhezijskih veza uspostavljenih između materijala kliznog para) [3].

Otpor na elastičnu deformaciju proporcionalan je modulima elastičnosti materijala kliznog para, otpor na plastičnu deformaciju ovisi o njihovim granicama tečenja, otpor na brazdanje ovisi o njihovim duktilnostima i o brzini relativnog gibanja, a otpor na kidanje adhezijskih veza ovisi o jačini adhezijske veze (Van der Waals, elektrostatička, metalna i kovalentna) uspostavljene između materijala kliznog para. Objašnjenje porijekla sile trenja dano je slikom 6, koja prikazuje jedinični događaj procesa klizanja tj. slijed zbivanja od početka do završetka dodira jednog para mikroizbočina.



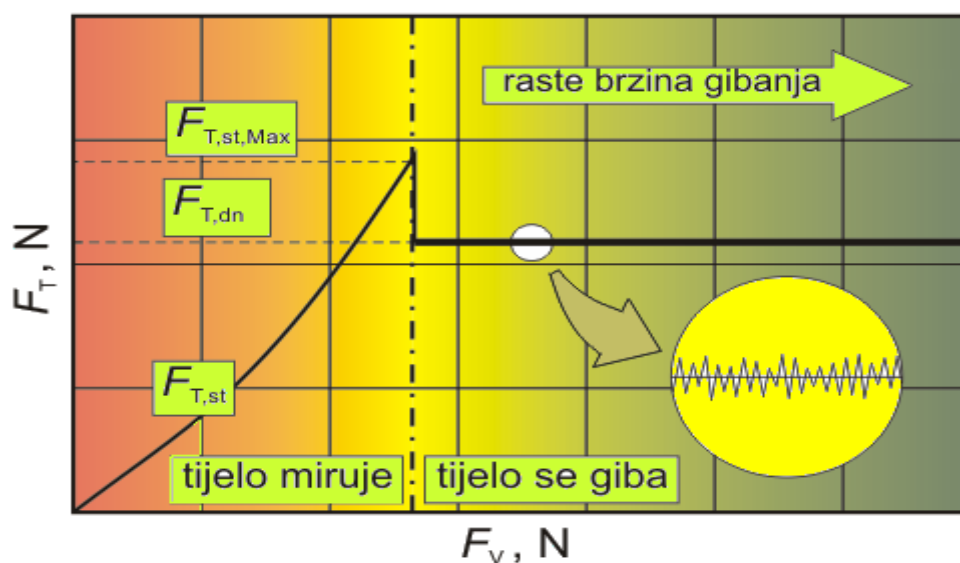
Slika 6. Faze procesa klizanja [1]

Trenje kod klizanja koje nastaje između dva elementa tribosustava ilustrira pravila kod trenja (empirijske zakone) koji vrijede:

- Sila trenja (F_t) djeluje suprotno od smjera relativnog gibanja i kod suhog dodira proporcionalna je normalnom opterećenju (F_N);
- Faktor trenja definira se kao omjer sile trenja i normalnog opterećenja;
- Sila trenja ne ovisi o nominalnoj dodirnoj ploštini, niti o brzini klizanja.

Jedinični događaj procesa klizanja od početka do završetka dodira jednog para mikroizbočina (asperities) opisuje porijeklo sile i mehanizam trenja [3].

Sila trenja klizanja ($\mu_{kl, dn}$) ne ovisi o brzini gibanja tijela do oko 1,5 m/s, dok se sila trenja klizanja pri daljem povećanju brzine gibanja smanjuje, što osobito dolazi do izražaja pri brzinama preko 600 m/s kao što je prikazano slikom 7.



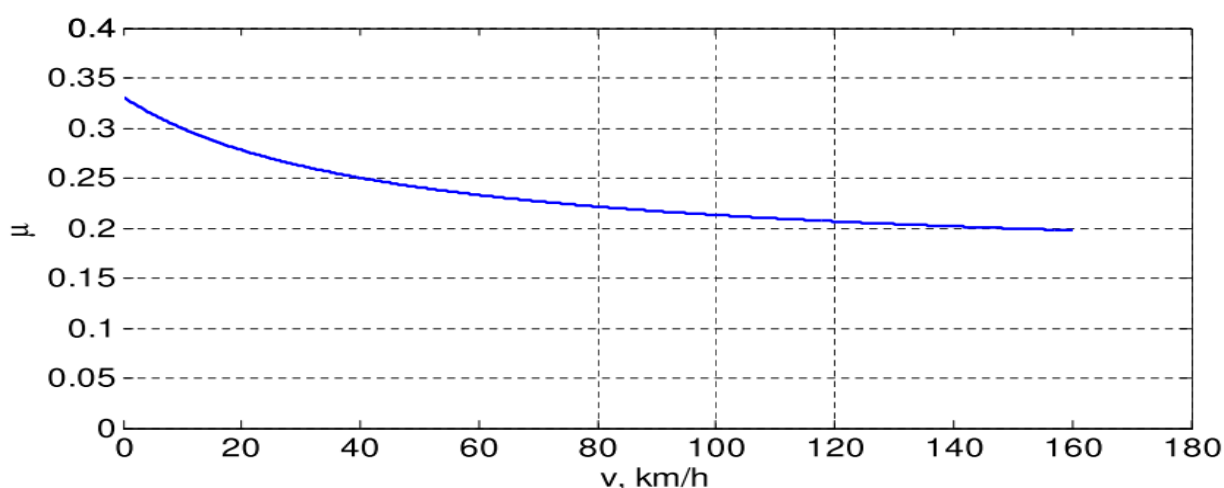
Slika 7. Dijagram promijene sile trenja prije i nakon početka djelovanja vučne sile [4]

Gibanje kotača po tračnici može biti uglavnom trojako: kotrljanje, kotrljanje s djelomičnim klizanjem i klizanje. Poželjniji, potrebni i normalni način gibanja kotača je kotrljanje. Ostala su dva načina štetna i za kotače i za tračnicu (prugu).

3. ADHEZIJA I KOEFICIJENT ADHEZIJE

Pojednostavljeno rečeno adhezija je iskoristivi dio trenja, a izražava se kroz koeficijent adhezije μ . Koeficijent adhezije je ovisan o brzini vozila kao i materijalu kotača i tračnica, neravninama na površini tračnica, prisutnosti stranih tijela na tračnicama, vremenskim uvjetima i dr.

Kao primjer na slici 8 je prikazana krivulja srednje vrijednosti koeficijenta adhezije u ovisnosti o brzini prema rezultatima istraživanja Curtiusa i Knifflera, koje su u primjeni kod više europskih željeznica.



Slika 8. Krivulja srednje vrijednosti koeficijenta adhezije u ovisnosti o brzini gibanja vlaka [6]

Ista krivulja je prikazana i empirijskom jednačbom (13):

$$\mu(v) = 0.161 + \frac{7.5}{44 + v} \quad (13)$$

Zbog postojanja trenja i pritiska kotača na trasu, dolazi do adhezije (prilijepanja) između kotača i trase, koja sprječava klizanje kotača po trasi. Da bi se kotač kotrljao po trasi a da se ne skliže, potrebno je da točka oboda kotača, koja se u danom momentu dotiče trase, bude u odnosu prema trasi nepomična.

Da ne dođe do klizanja kotača po trasi mora biti vučna sila manja od granične sile adhezije, tj (14):

$$F_{ob} = g \cdot G_a \cdot \psi \quad (14)$$

gdje su:

- F_{ob} - vučna sila vozila na obodu pogonskih kotača u N,
- g - gravitacijska konstanta,
- G_a - adhezijska masa vozila u kg,
- ψ - koeficijent adhezije.

Sve dok je F_{ob} manja od $\psi \cdot G_a$ kotač će imati potrebno uporište i on će se normalno kotrljati uzduž staze, a prema tome i vozilo će imati translacijsko gibanje. U slučaju da je $F_{ob} \geq g \cdot G_a \cdot \psi$ poremetit će se adhezija između kotača i tračnice, povećat će se klizanje kotača, a rotacija će biti veća od translacijske brzine vozila. Da se to spriječi, potrebno je smanjiti moment vrtnje kotača regulacijom motora vozila povećanjem koeficijenta adhezije (npr. sipanje pijeska po tračnici kad se radi o lokomotivi).

Pogonska se sila može povećati samo djelujući na one tri veličine u izrazu (14), koje ju i određuju: povećanjem odnosa adhezije prema ukupnoj masi (primjer lokomotive sa svim pogonjenim osovinama), povećanjem trenja put - kotač (na što je prilično teško utjecati, odnosno nije moguće uvijek i za trajno), i konačno, povećanjem ukupne mase vozila, što je efikasan način, ali ima i praktične granice jer vozila postaju glomazna i teška, što naravno zahtijeva povećanje snage motora [7].

4. MEHANIZMI TROŠENJA MATERIJALA

Trošenje materijala može se definirati kao neželjeni gubitak krutog materijala s krutih površina koji nastaje zbog mehaničkih interakcija. Obično se trošenje kvantificira određivanjem specifične brzine trošenja (specific wear rate), μ_{sp} , mjerenjem volumetrijskog gubitka uzorka (V_{loss}) pri primijenjenoj sili (F) i putu klizanja (D) (15) :

$$\mu_{sp} = \frac{V_{loss}}{F \cdot D} \quad (15)$$

Standardna mjerenja trošenja raznih materijala u uvjetima abrazije koja se provode prema normi (ASTM G 65-85), trebaju dati mjerljive rezultate promjene mase što ovisi o danom sastavu odabranih uzoraka. Također, trošenje, iako ključno za uhodavanje kliznih parova i obradu odvajanjem čestica, uzrokuje goleme gubitke materijala. Sama pojava trošenja se generira na mehanički i/ili kemijski način i općenito gledano se ubrzava kod trenja. Trošenje uključuje osnovne fenomene koji svi imaju zajedničko svojstvo uklanjanja čvrstog materijala s površine. U većini slučajeva do trošenja dolazi površinskim interakcijama na neravninama. Osnovni mehanizmi trošenja su abrazijski, adhezijski, umor površine i tribokorozija. Svi mehanizmi, osim umora površine, dovode do sporog odstranjivanja materijala [8].

4.1 Adhezijsko trošenje

Adhezijsko trošenje nastupa u slučaju kada je ključna adhezija (međusobno spajanje) kada su dva nominalno ravna čvrsta tijela u kontaktu klizanjem, bez ili sa podmazivanjem.

Adhezija se uslijed smicanja pojavljuje na površinama u kontaktu na međupovršini (glatka manje hrapava površina potiče adheziju odnosno adhezijsko trošenje). Adhezijsko trošenje nastupa kada se neravnine odnosno izbočine koje su uslijed klizanja u kontaktu smiču, što može rezultirati odvajanjem dijelova s jedne i dodatno ‘naljepljivanjem’ dijelova jedne površine na drugu površinu. Preneseni fragmenti mogu otpasti s površine na koju su preneseni te preneseni natrag na originalnu površinu, ili se mogu formirati čestice trošenja. Neke čestice trošenja su slomljene procesom umora, za vrijeme ponovljenih opterećenja i rasterećenja, što konačno rezultira odvajanjem čestica i kao posljedica gubitkom mase tijekom adhezijskog trošenja.

Odvajanje dijelova čestica od materijala adhezijskim trošenjem pretpostavlja nekoliko mehanizama u najslabijem području:

- Transfer fragmenata između blokova;
- Plastično smicanje i stvaranje pukotina duž kojih se odvajaju fragmenti;
- Kemijska promjena fragmenata koji se odvajaju s velikom površinom koja oksidira i smanjuje adhezijsku čvrstoću;
- Uklanjanje čestica nakon prekida adhezijskih veza.

U tablici 2 prikazane su tipične vrijednosti konstante trošenja (k) parova materijala i njeno sniženje sa stupnjem podmazivanja (degree of lubrication).

Tablica 2. Tipične vrijednosti konstante trošenja (k) parova materijala i njeno sniženje sa stupnjem podmazivanja

Površina	Metal na metal, $k \cdot 10^{-6}$		Nemetal na metal, $k \cdot 10^{-6}$
	Slični	Različiti	
Čista (bez podmazivanja)	1500	463	1.5
Slabo podmazana	300	461	1.5
Prosječno podmazana	30	459	0.3
Odlično podmazana	1	457	0.03

Adhezijsko trošenje nastupa kada se neravnine izbočine koje se uslijed klizanja u kontaktu smiču, što može rezultirati odvajanjem dijelova s jedne i dodatno “naljepljivanjem” dijelova jedne površine na drugu površinu. Kako napreduje klizanje, preneseni dijelovi mogu otpasti s površine na koju su nanošeni i biti preneseni natrag na originalnu površinu, ili se mogu odvajati čestice trošenja. Sniženje adhezije između površina snizuje trenje, pri čemu dobro podmazane površine (well-lubricated) pokazuju slabu adheziju i stoga i nisko trenje.

Porast adhezije između površina povišuje trenje. Mala količina kapljevine koja je prisutna na međupovršini može i suprotno tj. povišiti adheziju posredstvom kapljevine, što može rezultirati visokim trenjem, posebno između glatkih površina. Površine čistih metala i legura u kontaktu posjeduju visoku adheziju (jake metalne veze) i odgovarajuće visoko trenje (visoki faktor trenja oko 2 i više), pri čemu oksidi metala i nečistoće snizuju adheziju i trenje.

Trošenje materijala predstavlja oštećenje površine ili uklanjanje materijala s jedne ili s obje čvrste površine u kontaktu, koje se klizu, kotrljaju ili gibaju, relativno u odnosu jedna na drugu. Do trošenja, u većini slučajeva, dolazi preko površinskih interakcija na neravninama. Trošenje je progresivni gubitak materijala uslijed dinamičkog kontakta s drugim čvrstim tijelom ili kapljevinom tijekom relativnog gibanja a materijal se na dodirnim površinama mijenja.

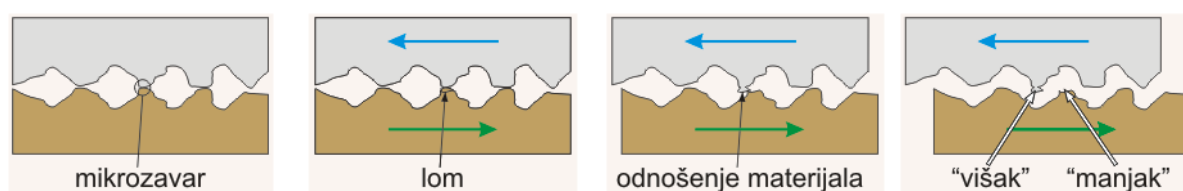
Svojstva krutog tijela su promijenjena, makar na površini ili blizu površine kada je materijal na površini istisnut. Svojstva površine i materijala se mijenjaju i kada je malo ili nimalo materijala izgubljeno, zbog promjena na mikro i nano-razini [3].

Proporcionalno je stupnju trošenja (k_a), površna pritiska (P) te tvrdoći po Vickersu (H) mekše površine, a obrnuto proporcionalno maksimalnom površinskom pritisku P_{maks} (16):

$$TR = k_a \left(\frac{P}{P_{maks}} \right) H \quad (16)$$

Na slici 9 je prikazan mehanizam adhezijskog trošenja.

- (a) kontakt dvije izbočine
- (b) adhezija između dvije izbočine
- (c) otkidanje (eventualno) i oblikovanje formacija čestica trošenja



Slika 9. Mehanizam adhezijskog trošenja [4]

Volumen adhezijskog trošenja (v) za plastični kontakt - proporcionalan je primijenjenom opterećenju (W ili F_N) i udaljenosti kod klizanja (x) i općenito je obrnuto proporcionalna tvrdoći (H) površine koja se troši (17):

$$v = \frac{k \cdot Wx}{H} \quad (17)$$

Brzina trošenja materijala s primarno plastičnim kontaktom općenito opada s porastom tvrdoće, za danu kombinaciju materijala. Za plastične kontakte stvaranje čestica kod trošenja, volumen trošenja raste sa ($A_r = W/H$), i s udaljenosti kod klizanja, x svakom interakcijom na neravninama, odnosno raste s stvarnim područjem kontakta, A_r ,

Volumen adhezijskog trošenja (v) za elastični kontakt - do kojeg dolazi na vrlo glatkim površinama je proporcionalan bezdimenzijskoj konstanti trošenja (k'), primijenjenom opterećenju (W) i udaljenosti kod klizanja x . Međutim opada s hrapavošću površine (σ/β^*) gdje je σ standardna devijacija površinskih uzvišenja (surface height), β^* odgovarajuća duljine te E^* efektivni modul elastičnosti E^* (18):

$$v = \frac{k'Wx}{E^* \left(\frac{\sigma}{\beta^*} \right)} \quad (18)$$

Kako smanjiti primarno adhezijsko trošenje za danu kombinaciju materijala gdje je prisutan primarno plastični i primarno elastični kontakt je objašnjeno pomoću navedenih jednažbi.

Primarno plastični kontakt;

Kod primarnog plastičnog kontakta kako bi smanjili primarno adhezijsko trošenje potrebno je sniziti jačinu veza podmazivanjem i opterećenje, smanjiti stvarnu površinu dodira ($A_r = W/H$), opterećenje (W), te put klizanja, a s druge strane povećati tvrdoću (H)(19):

$$v = \frac{k \cdot Wx}{H} \quad (19)$$

Primarno elastični kontakt;

Kod primarnog elastičnog kontakta kako bi smanjili primarno adhezijsko trošenje potrebno je sniziti opterećenje (W), i smanjiti put klizanja (x), a s druge strane povećati hrapavost (v/β^*) te povisiti efektivni modul elastičnosti (E^*)(20) [3]:

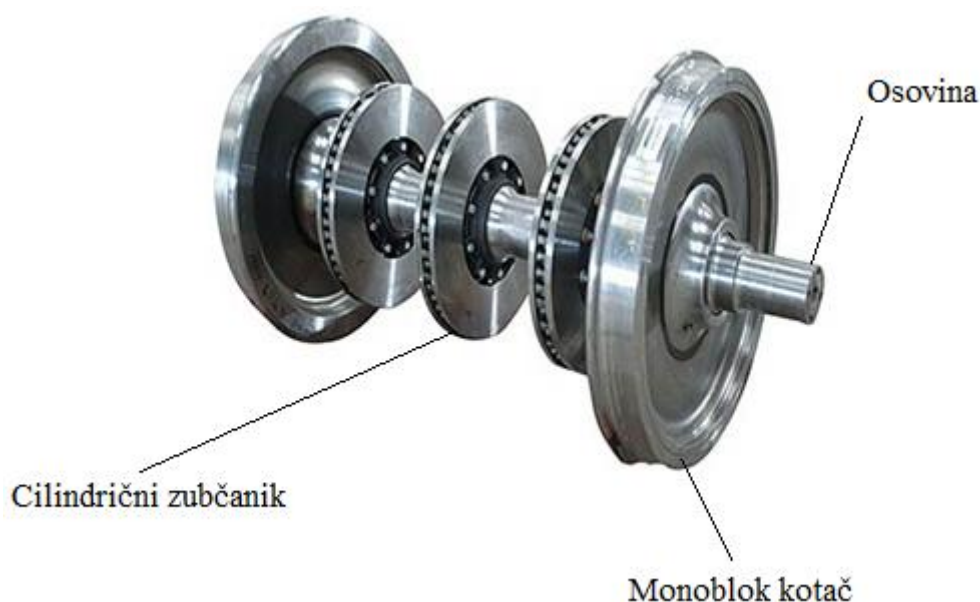
$$v = \frac{k'Wx}{E^* \left(\frac{\sigma}{\beta^*} \right)} \quad (20)$$

5. OSOVINSKI SKLOP

Kolni slog ili osovinski sklop predstavlja osovinu s dva čvrsto navučena kotača tako da taj sklop djeluje kao cjelina. Razlikuju se pogonski i slobodni osovinski sklop. Oni predstavljaju sklop od najvećeg značenja za sigurnost vožnje. Ovisno o tipu prijenosnika snage pogonski osovinski sklop ima i element za prijenos snage učvršćen na osovinu.

Ovdje je upotrijebljen izraz osovina zbog uvriježenosti toga izraza na željeznici iako bi ispravno bilo upotrijebiti izraz vratilo s obzirom na to da taj strojni element, osim što rotira, prenosi i okretni moment na pogonski osovinski sklop koji pogon dobiva od elektromotora čvrsto je navučen veliki cilindrični zupčanik. S vučnog elektromotora okretni moment se dovodi preko cilindričnog zupčanika (3) na osovinu (1) i kotače (2). Navedene dimenzije kolnog sloga su standardizirane, osim promjera kotača.

Na slici 10 je dan promjer kotača od 1000 mm, ali se on razlikuje za pojedina vozila što će biti prikazano u daljnjem dijelu rada. To ovisi o vrsti vozila, načinu pogona i konstrukcijskom rješenju proizvođača. Osovinski sklopovi na vučnim vozilima s mehaničkim ili hidrodinamičkim prijenosnikom snage dobivaju pogon preko osovinskih prijenosnika [9].



Slika 10. Osovinski sklop [10]

5.1. Kotači kod željezničkih vozila

Kotači su među najviše opterećenim komponentama željezničkog vozila i izloženi su visokim opterećenjima. Služe za vođenje vozila kroz odgovarajuće točke i zavoje. Prenose sile kočenja i ubrzanja i temperature na površini kotača čime mogu doseći do više stotina stupnjeva Celzijusa. Različita funkcionalna područja kotača, poput obruča s rezervom za trošenje, vijenca, lista i čvorišta (5) imaju razne zadatke i zahtjevaju različita svojstva materijala. Ove osobine materijala uglavnom određuje toplinska obrada kotača. Kotači se izrađuju od kvalitetnog čelika lijevanjem ili valjanjem, a obruči valjanjem sa specijalnom termičkom obradom.

Kotači kolnog stoga mogu biti izvedeni na dva načina, i to kao:

- kotači s obručem ili bandažom
- kotači iz jednog dijela (monoblok kotači).

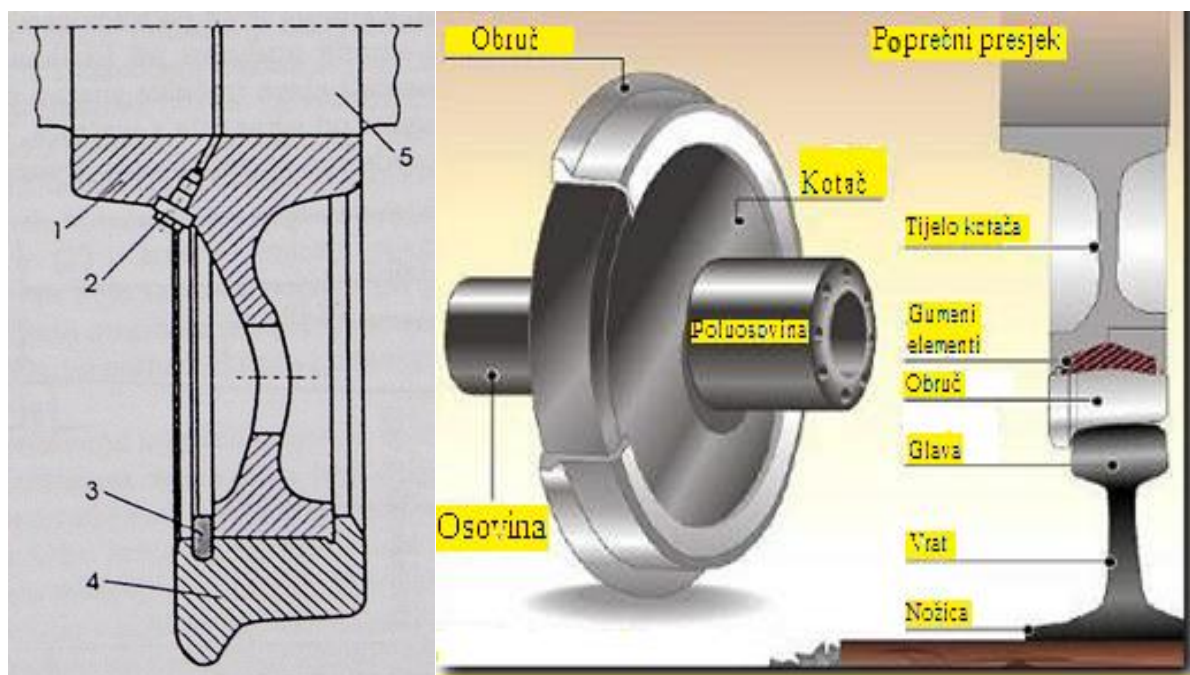
5.1.1 Kotač s obručem

Kotač s obručem (slika 11) sastoji se od tijela kotača (1), obruča (4) i sigurnosnog prstena (3). Obruč se navlači na tijelo kotača nakon što se prethodno zagrije na temperaturu 250 - 300 °C. Hlađenjem se između obruča i tijela kotača stvara čvrsti spoj koji osigurava siguran rad kotača u eksploataciji. Pri dužem kočenju čeljusnim kočnicama obruč se zagrijava, što bi moglo dovesti do popuštanja spoja s tijelom kotača. Da bi se u takvim slučajevima spriječilo spadanje obruča s tijela kotača, ugrađuje se sigurnosni prsten.

Kotači se na osovinu (5) navlače u čvrstom spoju s pomoću preše. Skidanje kotača s osovine moguće je dovođenjem ulja iz hidraulične preše pod visokim tlakom (oko 1000 bar) između dodirnih površina osovine i tijela kotača preko odgovarajućeg priključka na kotaču (2).

Osnovna prednost kotača s obručem ogleda se u mogućnosti zamjene samo obruča nakon istrošenja, čime se štedi materijal.

Željeznički kotači su opterećeni s 11 tona, uglavnom u središnjem dijelu vozne površine. Tu se osim težine moraju osobito prenjeti propulzivne sile i sile kočenja. Vijenci se stanjuju u srednje oštrim zavoјima.

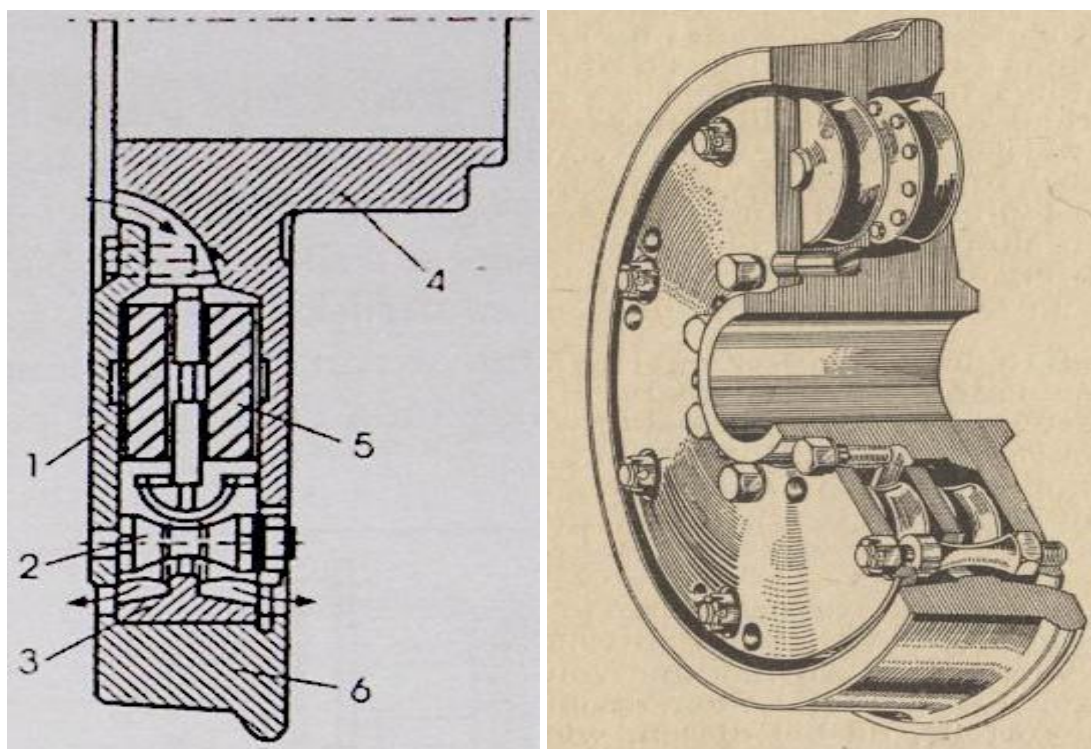


Slika 11. Kotač s obručem.

5.1.1.1 Kotač s gumenim elementima

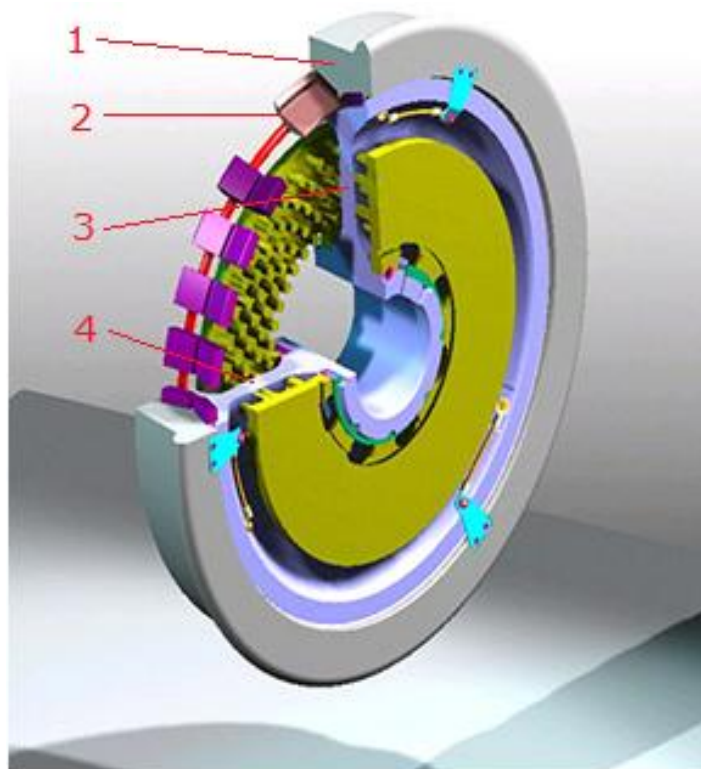
Da bi se smanjila dinamička opterećenja i vibracije, mogu se koristiti kotači s elastičnim elementima (slika 12). Tijelo kotača (4) se preko gumenih elemenata (5), ploče (1), vijaka (2) i naplatka (3) veže s obručem kotača (6). Gumeni elementi znatno smanjuju neogibljene mase (75 - 80 %), poboljšavaju adhezijska svojstva kotača, smanjuju vertikalna ubrzanja i buku (20 - 30 %). Nedostatak takve izvedbe kotača predstavlja povećani otpor vožnje i visoka cijena.

Zbog unutarnjeg trenja gumenih elemenata i između tih elemenata i metalnih dijelova kotača stvara se toplina kojom se ti elementi zagrijevaju. Za hlađenje tih dijelova koristi se prirodna cirkulacija zraka kroz predviđene otvore kako to na slici pokazuju strelice.



Slika 12. Kotač s gumenim elementima

Nešto drugačije i jednostavnije rješenje kotača s gumenim umecima prikazano je slikom 13. Između tijela kotača (4) i obruča kotača (1) ugrađeni su gumeni elementi (2). Učvršćenje i osiguranje spoja ostvaruje se posebnim prstenom (3). Takav kotač nešto je jednostavnije konstrukcije, a osigurava ista svojstva kao što su navedena u prethodnom slučaju [9].

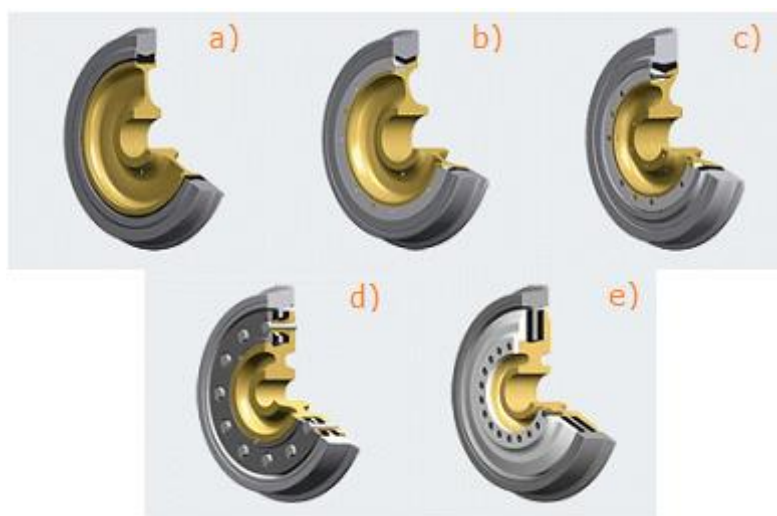


Slika 13. Kotač s gumenim umecima [10]

Kotač s gumenim umecima koristi se u različitim izvedbama vučnih i vučenih vozila ovisno o potrebama koje zahtjevaju različite karakteristike, od vozila za transportni prijevoza pa sve do modernih niskopodnih željezničkih vozila.

Pri tome razlikujemo nekoliko različitih izvedbi samog kotača s gumenim umecima koju su navedeni na sljedećoj stranici i prikazani slikom 14.

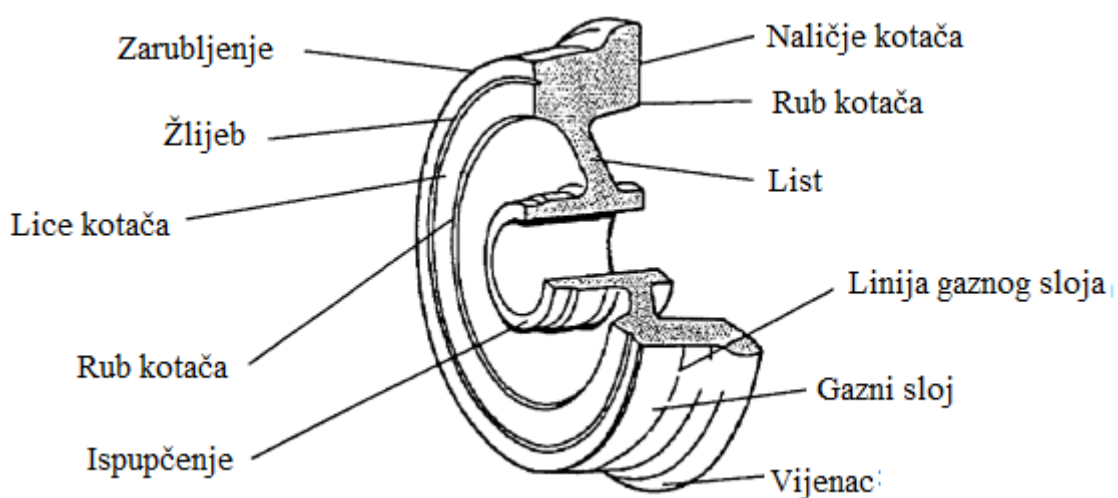
- a) **Vrsta kotača "BO 54"** "Bochumov jednorstenasti kotač" sastoji se od kotača, gumenih elemenata i diska kotača. Koristi se kod transportnih vozila diljem svijeta;
- b) **Vrsta kotača "BO 84"** Ova nova verzija ima podijeljeno tijelo kotača. To omogućuje rastavljanje i ponovno sastavljanje gume s najjednostavnijim sredstvima, kod odgovarajuće situacije instaliranja čak i pod vozilo. Kotači ove vrste su prodani više od 50.000 puta;
- c) **Vrsta kotača "BO 2000"**, BO 2000 je logičan razvoj tipa BO 84. Uz zadržavanje jednostavnosti i mogućnosti montaže znatno je povećana aksijalna krutost kotača;
- d) **Vrsta kotača "BO 01"** viskoelastičan dvostruko suspenzijski kotač je posebno dizajniran za masovni prijevoz vozila s ograničenom primarnom suspenzijom. U usporedbi s dvostrukim suspenzijskim kotačem starije verzije ovaj kotač može kod usporedivog opterećenja biti izrađen s manjim promjerom vozne površine;
- e) **Vrsta kotača "LoRa"** Ovaj viskoelastičan dvostruko suspenzijski kotač je posebno razvijen za visoka osovinska opterećenja modernih niskopodnih željezničkih vozila. Zbog posebnog dizajna, postignuto 30 postotno povećanje nosivosti kotača u odnosu na kotač vrste "BO 01".



Slika 14. Vrsta kotača s gumenim umetcima [11]

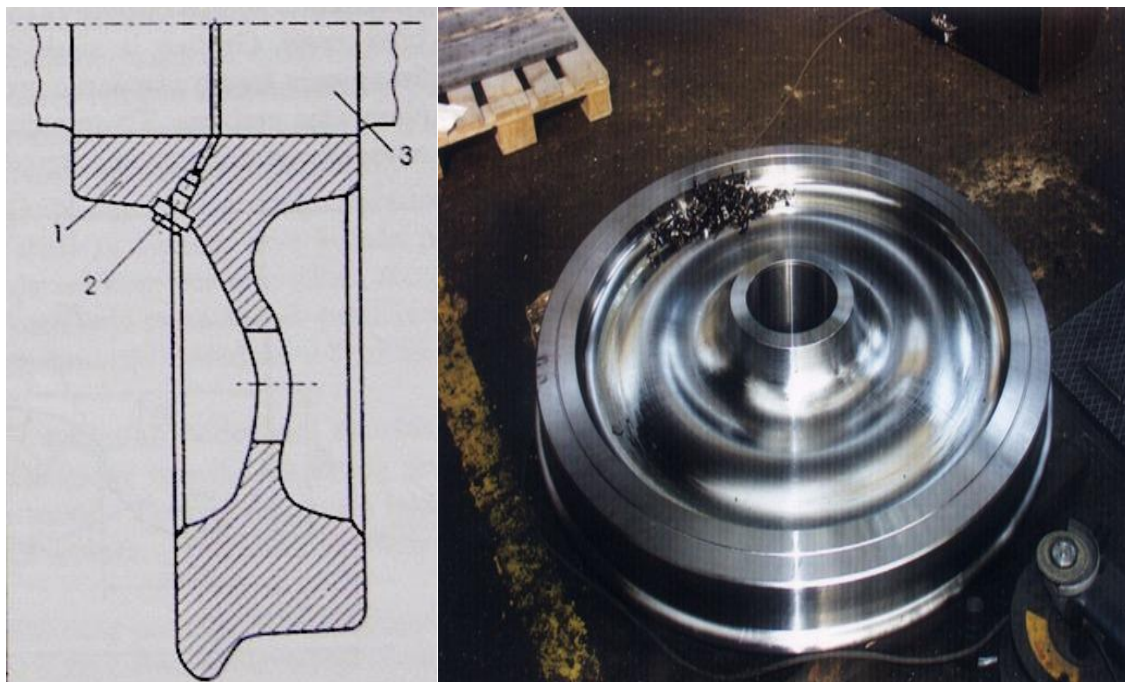
5.1.2. Monoblok kotač

Kotač iz jednog dijela ili monoblok kotač (slika 15) ima znatne prednosti u odnosu na kotač s obručem zbog čega se sve više primjenjuje. Takvi kotači sigurniji su u eksploataciji jer nema opasnosti od pucanja i spadanja obruča. Mogu se znatno više trošiti i lakši su od kotača s obručem. Stoga se kotači iz jednog dijela redovito primjenjuju na vozilima za velike brzine. Međutim, njihova primjena je skuplja jer se nakon istrošenja mora mijenjati cijeli kotač. Monoblok kotači su izloženim jednakim opterećenjima kao i kotači s obručem.



Slika 15. Monoblok kotač [12]

Kotač (1) se na osovinu (3) navlači s pomoću preše, a skida dovodenjem ulja iz hidraulične preše pod visokim tlakom (oko 1000 bar) između dodirnih površina osovine i tijela kotača preko odgovarajućeg priključka na kotaču (2) što je vidljivo na poprečnom presjeku monoblok kotača prikazanog slikom 16.



Slika 16. Poprečni presjek monoblok kotač

5.1.2.1 Profil oboda monoblok kotača

Profil oboda kotača je standardiziran, a predstavlja profil vanjske površine kotača željezničkog vozila. Osnovne dimenzije profila moraju se ostvariti tokarenjem pri proizvodnji i obnovi kotača. Taj se profil mora na vozilima u prometu redovito kontrolirati i po potrebi korigirati ili, ako je istrošenje kotača blizu dopuštenoga, potrebno je zamijeniti obruč kotača ili cijeli kotač ako je riječ o kotaču iz jednoga dijela. Definirani profil oboda kotača potreban je za ostvarivanje dobrog vođenja kotača i kolnih slogova po tračnicama te bolje vođenje kroz zavoje. Zbog nalijetanja na vanjsku tračnicu u zavoju vanjski kotači se kotrljaju na većem promjeru nego unutarnji, čime se smanjuje proklizavanje kotača i otpor u zavoju [9].

5.1.2.2 Vijenac monoblok kotača

Vijenac, koji pridržava kotač na tračnici postavljen je s unutarnje strane kolosijeka i normalno je udaljen 5 mm od unutarnjeg ruba glave tračnice. Promjer mu je za 40 do 50 mm veći od promjera kotača (oboda). Vijenac kotača osigurava usmjeravanje kolnog sloga po tračnicama i pri kretanju kroz zavoj.

Vijenac je zaobljen da se smanji opasnost od izkliznuća iz tračnica. Smanjenju trenja i trošenja vijenca kotača i glave tračnice znatno pridonosi podmazivanje vijenca, o čemu će biti riječ narednim poglavljima.

Najčešće izvedbe su prskanjem ulja na vijenac odgovarajućom brizgaljkom kojom upravlja posebni elektronski uređaj te grafitnim štapom koji se postavlja tako da se oprugom pritišće na vijenac. Vijenac monoblok kotača vučnog vozila je oko 3 centimetra visoka okomita perla koja se nalazi na strani koja usmjerena prema središtu kolosijeka.

Na kupolu vijenca monoblok kotača se u pravilu spaja rub vijenca kotača koji je nagnut pod kutem od 70 stupnjeva, prije nego će vijenac preko utora preć u voznu površinu. Korištenjem vijenca kotača vozila se može kretati u okomitom smjeru, i to ulaskom u žlijep vijenca u utor, tako da je ulazak jednog vijenca kotača u unutrašnju stranu glave tračnice ograničen. Zbog toga se pogotovo u donjem brzinskom rasponu osigurava dobro vođenje vijenca kotača. Vijenac izaziva dodatno trenje između kotača i tračnice [13]. Slikom 17 su prikazane različite izvedbe kotača s vijencem i sama primjena u razne svrhe.



Slika 17. Različite izvedbe kotača s vijencima i primjena [14]

Tablicom 3 prikazane su mjere za kotač i osovinski sklop na željezničkom vozilu koje vrijede za teretne vagone S, putnički vagon, teretni vagon (SS) i vučno vozilo serije 7121/4121, 6011/4011, 1061, 2132, 2041, 2041, 2061, 2062, 2063, 2043, 2044, 2045.

Također vrijedi za vučno vozilo serije 1141 i 1142, upravljački vagon 4111/5111 te motorni vagon 6111.

Tablica 3. Mjere za kotače i osovinski sklop na željezničkim vozilima [15]

Pozicija	Promjer ϕ kk krug kotrljanja (mm)	Najmanja mjera (mm)	Najveća mjera (mm)
Razmak vijenca, Rv	$\phi \text{ kk} \geq 840$	1410	1426
	$\phi \text{ kk} < 840$	1415	1426
Razmak kotača, RK	$\phi \text{ kk} \geq 840$	1357 ¹⁾	1363
	$\phi \text{ kk} < 840$	1359 ¹⁾	1362
Debljina vijenca, Dv	$\phi \geq 840$	22 ³⁾	33 ²⁾
	$840 > \phi \text{ kk} > 630$	27.5	33 ²⁾
Visina vijenca, Vv	$\phi \text{ kk} > 760$	26 ⁴⁾	36
	$\phi \text{ kk} \leq 760$	32	36
Nagib vijenca, Qr	≥ 330	$> 6.5^{5)}$	
Debiljna obruča, Do	≥ 330	30 ⁶⁾	
		35 ⁷⁾	
		38 ⁸⁾	
		44 ⁹⁾	
Širina obruča	≥ 330	133	136
			140 ¹⁰⁾

6. UTJECAJ TOPLINSKE OBRADE NA SVOJSTVA KOTAČA

Toplinska obrada započinje zagrijavanjem na tzv. temperaturu austenitizacije. Kotači su obično izrađeni od nelegiranog ili niskolegiranog ugljičnog čelika, koji su na oko 800 do 900 °C austenitiziraju. Na ovim temperaturama, atomska rešetka željeza pretvara se iz kubično prostorno centrirane strukture (ferita) u kubično plosnato centriranu (austenita), karbidi se otope i ugljik se ravnomjerno raspoređuje u materijalu. Zatim se užareni kotač ukloni iz peći i stavlja u stroj za hlađenje da se definirano ohladi. Slika 18 prikazuje takav kotač u hladnjaku neposredno prije početka samog procesa hlađenja. Struktura a na taj način i sva svojstva kotača nastaju isključivo samo u kontekstu kontroliranog hlađenja kotača i posebice ruba.



Slika 18. Kotač prije samog procesa hlađenja

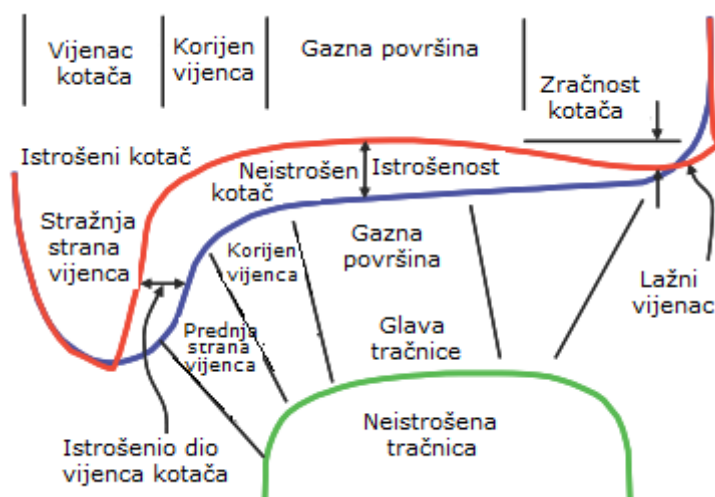
Konačno, kotači se ponovno žare na oko 450 - 550 °C, s ciljem smanjenja unutarnjih naprezanja. Mikrostruktura i time sva svojstva kotača su nastali isključivo u tijeku kontroliranog hlađenja kotača i posebno ruba. Hlađenje kotača i posebno ruba kotača je najvažniji korak postupka kod toplinske obrade željezničkih kotača u kojem se mehanička svojstva i mikrostruktura generiraju u roku od nekoliko minuta. Za vrijednosti svojstava materijala kotača koji se optimiraju pod utjecajem toplinske obrade, moraju se provesti propisani testovi u pogledu analize svojstava kao što su: čvrstoća, lomna žilavost, otpornost na umor, mikrostruktura (strukturne komponente i veličina zrna) i uticaja zaostalih naprezanja na sam kotač. Sposobnost izvedbe jednog željezničkog kotača ne zavisi o posebnosti samog čelika. Toplinska obrada kotača je ta koja osigurava optimalna svojstva materijala, a time ujedno i zaslužna za optimalan rad [16].

7. OPĆENITO O DODIRU KOTAČA I TRAČNICE

Kad se kotač sa opterećenjem od 90 do 150 kN osloni na tračnicu, oba tijela u točki kontakta dobiju ugib, što rezultira kontaktnom površinom od 1,5 do 2,0 cm². Ta mala površina gdje se susiđaju oba elementa osigurava četiri osnovne funkcije:

- nosi vozilo,
- održava ga da se kotrlja po projektiranoj stazi,
- vodi ga kroz krivine,
- prenosi sile pokretanja i kočenja.

Vremenom se sve više zahtijevalo od geometrijskog oblika kontakta površine dodira kotača - tračnica u cilju povećanja brzine, uvećanja osovinskog opterećenja, dok je dinamika vozila unapređena. Nekada su zahtjevi suprostavljajući: za velike brzine od vozila se traži kruće horizontalno riješenje, što u zavojima povećava sile. Naponi pritiska po kontaktnoj površini (maksimalne vrijednosti oko 1000 MPa) više nego što materijal (čelik) tračnica može da podnese elastično. Kako je okolina neopterećena, čelik biva istisnut (mikrostruktura biva poremećena duž zrnastih granica u čeliku), pa će se tračnica plastično deformirati i trošiti. Kao posljedica toga dolazilo je do promjena dimenzija i oblika kotača (slika 19)[17].



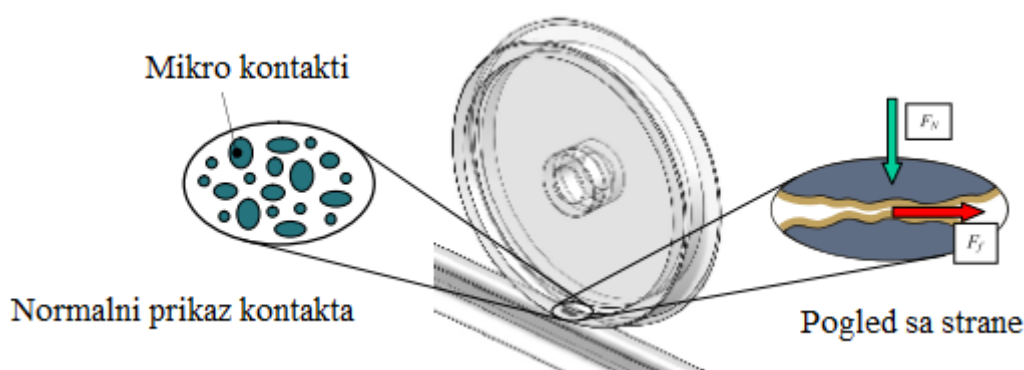
Slika 19. Promijena dimenzija i oblika kotača kao posljedica trošenja [18]

Osnovni parametri koji definiraju kontakt između kotača i tračnice su adhezija, klizanje i trošenje. Smatra se da trošenje uključuje odnošenje materijala usljed plastičnog tečenja sa dodirne površine kotača i tračnice. Adhezija i klizanje utječu jedno na drugo i mijenjaju oba aspekta trošenja.

Trošenje i plastično tečenje je u bliskoj vezi sa geometrijom profila kotača i tračnice i znatno utječe na dinamiku vozila.

Površina kontakta između kotača i tračnice, kao geometrijska karakteristika zavisi od polumjera zakrivljenosti dodirnih površina. Prirodna sila na kontaktu će zavisiti i od uvjeta površine i okoline, koji uključuju hrapavost, prisustvo vode, snijega, ulja i nečistoća. Osobine materijala i profila kotača i tračnice definiraju njihovu sinergiju, a najvažniji su tvrdoća, žilavost i termička provodljivost materijala.

Kontakt između kotača i tračnice je klizno/valjani kontakt (slika 20), što znači da se periferna brzina kotača može usporediti u granicama s ukupnom brzinom vlaka [17].



Slika 20. Kontakt i trenje između kotača i tračnice [18]

7.1 Hercova teorija

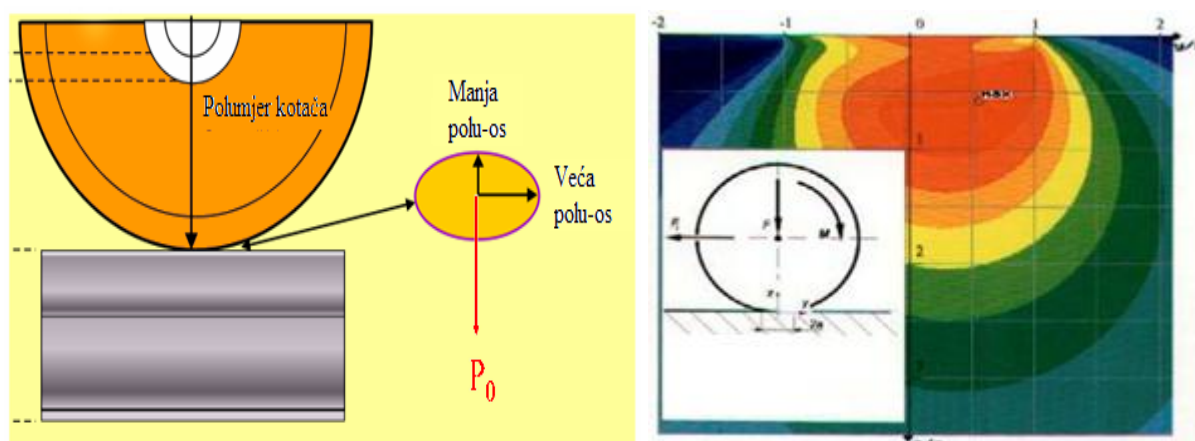
Hercova teorija objašnjava da elastična deformacija materijala (čelika) kotača i tračnice stvara elastičnu kontaktnu površinu, čija je veličina određena normalnom silom, a odnos osi elipsa zavisi od zakretljivosti profila kotača i tračnice. Oslanjanje kotača na tračnicu može da se dogodi u jednoj ili dvije točke. Koji slučaj će se dogoditi zavisi od stupnja istrošenosti kotača i tračnice koji su u dodiru.

Tablica 4. Dodir kotača i tračnice u zavisnosti od istrošenosti

Kotač	Tračnica	Oblik dodira
Stanje istrošenosti		
Nov	Nova	Sigurno u dvije točke
Istrošen	Nova	U jednoj točki
Nov	Istrošena	U jednoj točki
Istrošen	Istrošena	Većinom u dvije točke

Maksimalna točka naprezanja nije u dodirnoj površini, nego unutar kotača. Iz tog razloga je potrebno odrediti minimalnu dubinu tvrdoće, jer bi inače što je bitno kako nebi došlo do pucanja. To se odnosi kako za sučelje cilindričnog kotača / tračnica tako i za sučelje okrugli kotač / tračnica ravno.

Točke dodira i raspored naprezanja unutar glave tračnice za obje mogućnosti kontakta dobijen je fotoelastičnim mjerenjem, slika 21.



Slika 21. Otsak dodira kotača na tračnicu [5]

8. MEHANIZAM TROŠENJA VIJENCA MONOBLOK KOTAČA I POVRŠINE KOTRLJANJA

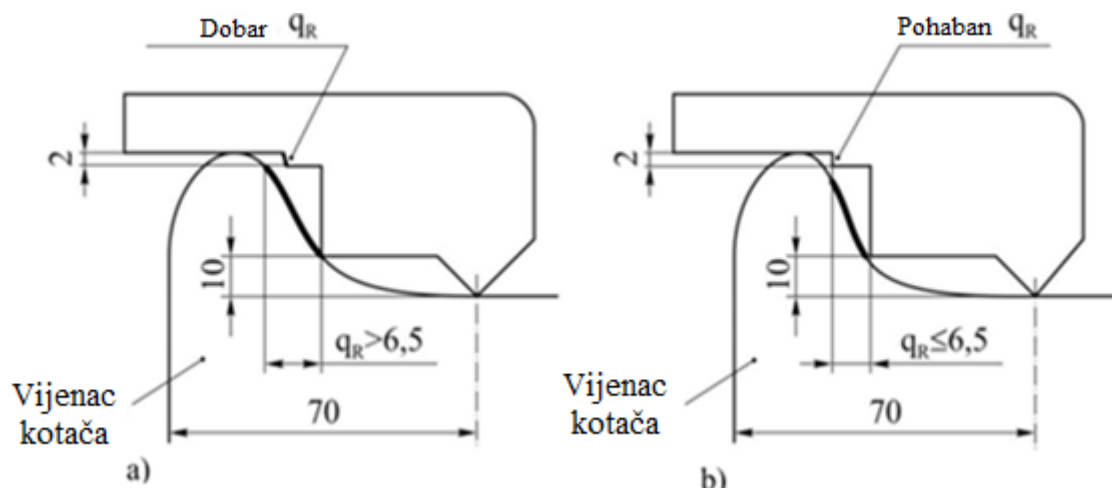
Pri eksploataciji svih željezničkih vozila, neizbježan je i prirodan proces trošenja vijenca monobloka kotača i površine kotrljanja, koji je grubo rečeno rezultat trenja nastalim između monobloka kotača u dodiru sa tračnicom i papučom za kočenje. Tom neizbježnom mehaničkom pojavom, konstruktori su tehničko - tehnološki uredili funkciju odnosa, tako da je u sustavu trenja kotač - tračnica element predviđen za veće trošenje kotača. Pri brzom kočenju kotač se ne okreće nego klizi i tako dolazi do mjestimičnog trošenja i zagrijavanja što dovodi do štetnih lokalnih promjena u strukturi, pa čak do pojave površinskih pukotina na površini. Nakon takve pojave, nužno je profiliranje monoblok kotača, gdje se prilikom toga promjer umanjuje i za 15-35 mm. Povećano trošenje vijenca i površine kotrljanja monoblok kotača javlja se na prugama sa dotrajanim tračnicama. Iznimno veliko trošenje vijenca i površine kruga kotrljanja monoblok kotača jest na prugama sa većim padovima gdje se u tom slučaju intenzivnije upotrebljavaju kočnice koje rezultiraju trošenju vijenca. Ovo može čak i rezultirati predgrijavanju kotača i dodatnog naponskog stanja u monoblok kotaču, što često dovodi do promijene čvrstoće materijala kotača i time bude ugrožena sigurnost prometa.

Isto tako, na enormnim uzbrdicama (usponima) često se primjenjuje uporaba pijeska na vučnom vozilu (lokomotiva, pružno vozilo) radi sprečavanja proklizavanja, naročito u uvjetima kada je kišno vrijeme ili snijeg, te pijesak koji sadrži elemente kvarcnih karbida, tvrdih mehaničkih karakteristika od materijala, monoblok kotača visoke kvalitete, znatno utječe na trošenje profila dodira kotača sa tračnicom, svih vučnih željezničkih vozila i tako ubrzano dovodi do enormnog trošenja vijenca kotača. Svi navedeni mehanički, konstrukcijski i procesno - eksploatacijski uzroci koji rezultiraju trošenju vijenca i ostale površine dodira sa tračnicom i kočnom papučom, uvjetuju za obaveznom tehničko-tehnološkom intervencijom, tj. za novim profiliranjem ili, eventualno obnavljanjem vijenca navarivanjem.

Pored toga bitno je napomenuti da na području železničkih uprava u okruženju se ne izvodi propisno održavanje tračnica kako na lokalnim istrošenim mjestima tračnica, tako i na mjestima spajanja tračnica, te je i time osjetno uvećano habanje profila kotrljanja kotača.

U svim ljetnjim mjesecima trenje monoblok kotača je za 30% veće nego u kišnim periodima, a tada su trošenja drastično veća te se potreba za profiliranjem, odnosno za regeneracijom i profiliranjem uvećava za 30% i više. Ispravnom eksploatacijom, tj. primjenom kočnice i kvalitetnim održavanjem kolosijeka, između dva profiliranja, kotači trebaju da prijeđu približno od 150.000 do 200 000 km.

Tijekom eksploatacije željezničkih vozila trošenje vijenca kotača se kontrolira karakterističnim mjerama: visinom vijenca V_v , debljinom vijenca D_v i mjerom q_R koja karakterizira nagib i polumjer korijena vijenca. Količina materijala koja se skida prilikom reprofiliranja, zavisi od karaktera istrošenosti profila, a kreće se u ekstremnim slučajevima i do 50 kg po kotaču. Na slici 22 prikazan je profil granične vrijednosti vijenca monoblok kotača, gdje su aktivne površine vijenca i mjeri (a) i vijenca kotača gdje su aktivne površine istrošene (b).

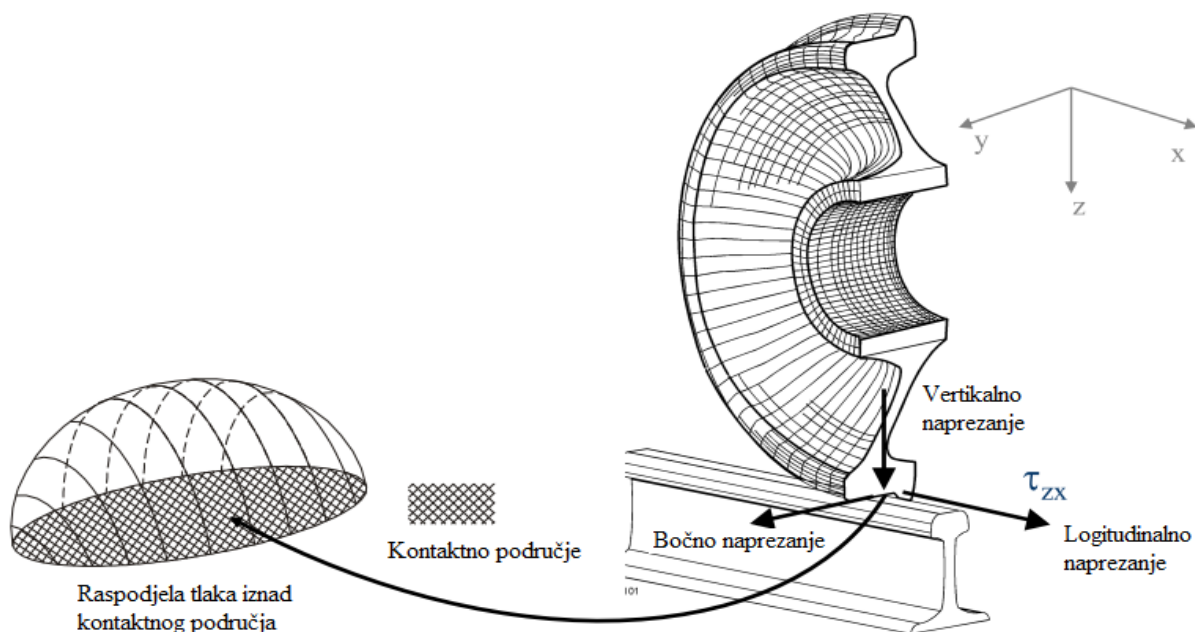


Slika 22. Granične veličine profila vijenca monoblok kotača

8.1 Sile u točki dodira kotača i tračnica i posljedice trošenja vijenca

Kretanje pružnih vozila po kolosijeku je direktno zavisno od veze kotač - tračnica. U kontaktnoj zoni između kotača vučnog vozila i površina tračnica rasuti materijali moraju biti dovoljno jaki da se odupru normalnim (vertikalnim) silama izazavnih teškim teretom i dinamikom zbog nepravilnosti između kotača i vozila. Tangencijalne sile u kontaktnoj zoni moraju biti dovoljno niske kako bi se omogućilo pomicanje teških tereta s malo otpora, a istovremeno tangencijalna opterećenja moraju biti dovoljno jaka da se osigura, trenje, kočenje i upravljanje vlakova.

Ta veza se karakterizira silama koje se pojavljuju u dodiru (slika 23).

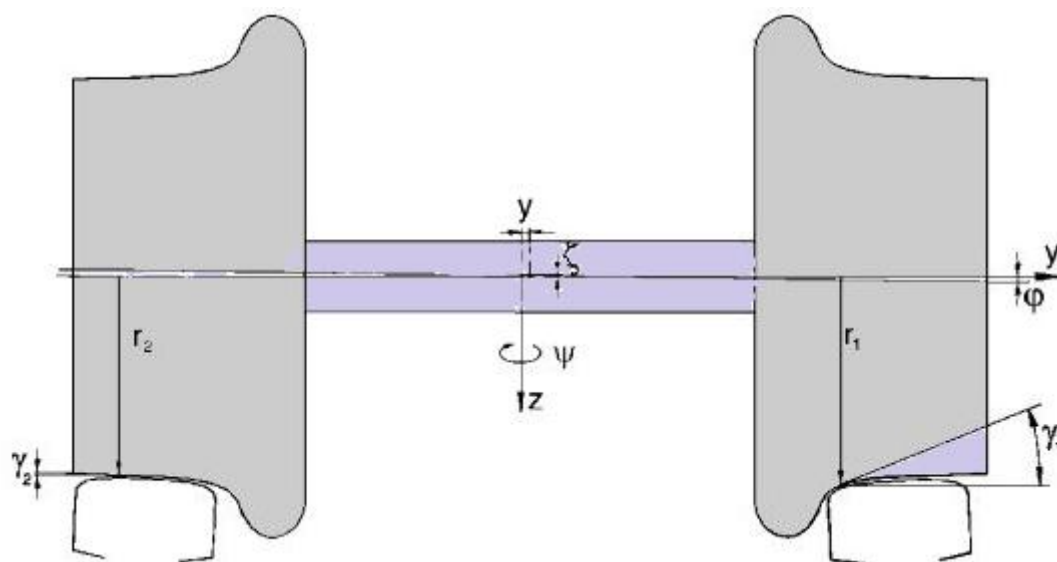


Slika 23. Sile u točki dodira kotača i tračnice

Za određivanje sila u dodiru potrebno je poznavati niz geometrijskih veličina, koja se tijekom kretanja osovinskog sklopa po kolosijeku mijenja u zavisnosti od trenutnog položaja osovinskog sklopa u odnosu na kolosijek. Položaj napadnih točaka, pravci sila, a indirektno i intenzitet sila u dodiru, zavise i od niza geometrijskih veličina, u koje spadaju:

1. Položaj točke dodira na lijevom i desnom kotaču,
2. Položaj točke dodira na lijevoj i desnoj tračnici,
3. Polumjeri trenutnih krugova kotrljanja u točkama dodira (r_1 , r_2) i njihova razlika (Δr),
4. Ekvivalentna konačnost,
5. Kut nagiba profila u točkama dodira (γ_d , γ_d),
6. Polumjeri zavoja profila kotača i tračnice u točkama dodira,
7. Koeficijent kontaktnih naprezanja u dodirnim točkama kao mjerilo tih naprezanja,
8. Kut nagiba osovinskog sklopa prema horizontu (φ) i vertikalno pomjeranje njenog težista (ζ)

Na slici 24 su prikazane pojedine od navedenih veličina, koje se mijenjaju sa položajem osovinskog sklopa u odnosu na kolosijek, te ih nazivamo funkcijama geometrije dodira. Položaj osovinskog sklopa u odnosu na kolosijek definiramo sa koordinatom bočnog otklona od srednjeg položaja – Y osi, dok je kut zakretanja oko vertikalne osi zanemariv Ψ . Možemo zaključiti da u ovakvom slučaju dolazi do neravnomjernog trošenja.



Slika 24. Veličine koje su u funkciji geometrije dodira

Tijekom eksploatacije navedeni parametri vijenca kotača se mijenjaju. Osnovni aspekti koji prikazuju utjecaj i značaj geometrije dodira na sile između kotača i trčnice su:

1. Kretanje maksimalnom brzinom na pravcu, kada se, pod određenim nepovoljnim uvjetima može pojaviti intenzivno vijuganje osovina, koje podrazumijeva ekstremno velike bočne dinamičke sile,
2. Slučaj prolaska kroz krivinu, kada je cijelo vrijeme prisutna obična komponenta koja vrši skretanje vozila.

U oba navedena slučaja geometrija dodira ima vrlo bitnu ulogu pri procesu eksploatacije i trošenja profila kotrljanja.

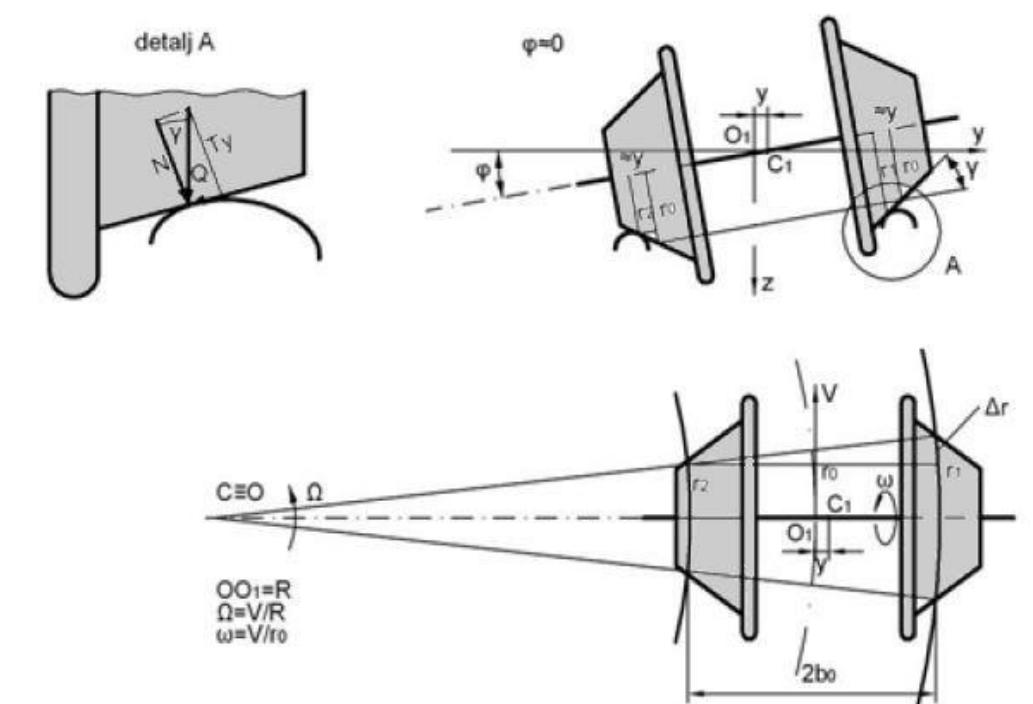
Osim prirodnog procesa potrošnje profila kotača, koje nastaje usljed trenja nastalim između monoblok kotača u dodiru sa tračnicom i papučom za kočenje znatan utjecaj ima geometrija dodira na sile između kotača i tračnice, a tim se slučajem stvaraju veća trenja, a time trošenje vijenca i profila kotrljanja monoblok kotača.

8.1.1 Trošenje vijenca kotača pri prolasku kroz zavoje bez klizanja

Kod koničnog oblika kotača omogućeno je da osovinski sklop bez sklizanja svlada zavoje, tako da se vijenac kotača koji je na vanjskom polumjeru zavoja približava tračnici i time prelazi duži put u odnosu na unutrašnji kotač. To ima za posljedicu i uvećano trošenje vijenca kotača u ekstremnim slučajevima kada je vijenac u neposrednom kontaktu sa tračnicom, u odnosu na unutrašnji vijenac kotača koji nije u neposrednom kontaktu sa tračnicom. U ovom slučaju osovinski sklop je pomjeren u desnu stranu za veličinu y .

Sa slike 25 je vidljivo da funkcija $\Delta r(y)$ predstavlja jednu od funkcija geometrije dodira a na osnovu izraza ta funkciju je linearna (21):

$$\begin{aligned} r_2 &= r_0 + n \cdot y \\ r_2 &= r_0 - n \cdot y \end{aligned} \rightarrow \Delta r = (r_1 - r_2) = 2n \cdot y \quad (21)$$



Slika 25. Sile pri prolazu kroz zavoje bez klizanja

8.1.2 Trošenje vijenca kotača pri prolasku kroz zavoj sa klizanjem

U slučajevima kada osovinski sklop koji je u sastavu nekog željezničkog vozila koje prolazi kroz zavoj konstantnom brzinom V , koji rotira oko O kutnom brzinom ω biti će izražen relacijom (22):

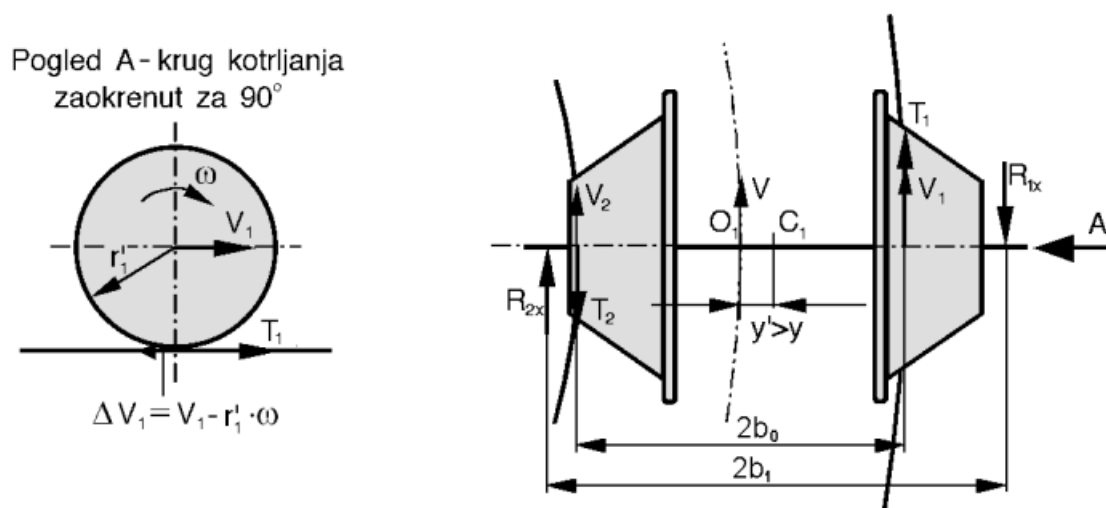
$$\Delta V_1 = V_1 - r'_1 \cdot \omega = r_1 \cdot \omega - r'_1 \cdot \omega = (r_1 - r'_1) \cdot \omega < 0 \quad (22)$$

Pretpostavimo da je osovinski sklop iz bilo kojeg razloga znatno pomjeren k spljoštenoj tračnici tako da je njegov položaj određen $y' > y_0$, $r'_1 > r_1$, a $r'_2 < r_2$. Točka dodira spljoštenog kotača sa tračnicom imat će u odnosu na tračnicu relativnu brzinu.

To znači da postoji relativno klizanje unatrag, a kao posljedica se stvara sila trenja. T_1 usmjerena unaprijed, što rezultira znatno bržem trošenju profila vijenca. Na unutrašnjem kotaču je obrnuto (23):

$$\Delta V_2 = V_1 - r'_2 \cdot \omega = r_2 \cdot \omega - r'_2 \cdot \omega = (r_2 - r'_2) \cdot \omega > 0 \quad (23)$$

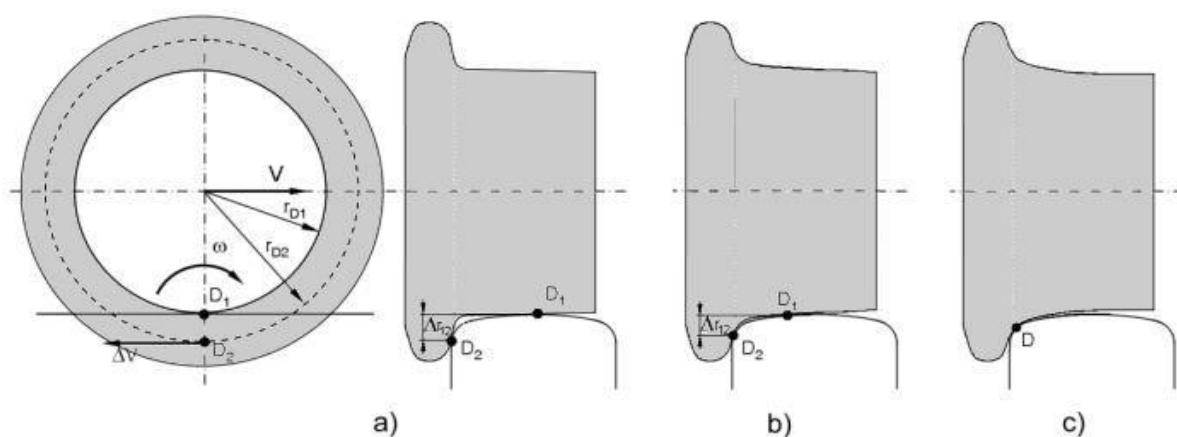
Vidljiv je značaj geometrije, kako prolazak kroz zavoj tako i za uvećano ili normalno trošenje profila vijenca i površine kotrljanja monoblok kotača. Slikom 26 su prikazane uzdužne sile pri prolasku kroz zavoj sa klizanjem.



Slika 26. Uzdužne sile pri prolasku kroz zavoj sa klizanjem

8.1.3 Utjecaj geometrije dodira na trošenje vijenca kotača

Intenzitet trošenja ocjenjuje se preko indeksa trošenja, koji predstavlja rad tangencijalnih sila u dodiru kotač - tračnica po jedinici prijeđenog puta. U slučaju dodira dvije točke (slika 27) taj se indeks sastoji od dijela vezanog za točku D_1 i dijela vezanog za točku D_2 . S obzirom da je reducirano klizanje daleko veće na vijencu nego na površini kotrljanja, glavno trošenje na prugama sa mnogo zavoja je, kao što to i praksa potvrđuje, na vijencu kotača.



Slika 27. Utjecaj geometrije dodira na trošenje vijenca Δr_{12} [7]

U točki dodira D_2 na vijencu, za naš slučaj je mjerodavna veličina rada sila trenja T_{x2} po jedinici prijeđenog puta. Dok točka prijeđe put 1, točka D_2 prokliže za Δl , pa se za promatrani slučaj indeks trošenja može prikazati izrazom (24):

$$I_h = \frac{T_{x2} \cdot \Delta l}{l} = \frac{T_{x2} \cdot \Delta V \cdot t}{V \cdot t} = \frac{T_{x2} \cdot \Delta V}{V} = T_{x2} \cdot \zeta \quad (24)$$

$$\Delta V = D_1 D_2 \cdot \omega = \Delta r_{12} \cdot \omega \quad (25)$$

$$\Delta r_{12} = r_{D2} - r_{D1}, \quad \omega = \frac{V}{r_{D1}} \quad (26)$$

ω – kutna brzina okretanja kotača

V – brzina kretanja osovinskog sklopa, odnosno željezničkog vozila

Redukcijsko klizanje $\zeta = \frac{\Delta V}{V}$ se može odrediti korištenjem relacije (27):

$$\zeta = \frac{\Delta V}{V} = \frac{(r_{D2} - r_{D1}) \cdot \omega}{r_{D1} \cdot \omega} = \frac{\Delta r_{12}}{r_{D1}} \quad (27)$$

Pa ćemo za promatrani slučaj imati (28):

$$I_h = T_{x2} \cdot \frac{\Delta r_{12}}{r_{D1}} \quad (28)$$

Sila (29):

$$T_{x2} = \mu \cdot N_{D2} \quad (29)$$

N_{D2} – normalna reakcija u točki D2

μ - koeficijent trenja u vijencu

Na osnovu prethodnih izraza, možemo konstatirati da se u vijencu javlja veliko trošenje, zbog velike vrijednosti reduciranog klizanja ζ , a ovo klizanje zavisi o vrijednosti Δr_{12} , Sa druge strane trošenje zavisi od sile T_{x2} , koja je funkcija normalne sile na vijencu N_{D2} . Iz ovog zaključujemo da se trošenje vijenca može smanjiti smanjenjem Δr_{12} i smanjenjem normalne sile u točki dodira vijenca N_{D2} . Na obje ove veličine se može značajno utjecati putem geometrije dodira. Izborom odgovarajućeg profila kotača u odnosu na tračnicu, moguće je doći do kombinacije profila kotača i tračnice tako da se kompletno eliminira dodir kotač -tračnica u dvije točke, tj. da funkcija Δr nema skokova ili su veoma mali.

8.1.4 Utjecaj geometrije dodira na trošenje vijenca zbog djelovanja vlastite sile

Na slici 29 je prikazan slučaj normalnih reakcija u dodiru kotač - tračnica kod koničnog profila neposredno prije dodira vijenca i boka tračnice. Ako normalne reakcije na lijevom i desnom kotaču N_L i N_d podijelimo na vertikalne i bočne komponente, slijedi da će vertikalne komponente uravnotežiti težinu koja se oslanja na svaki kotač. Bočne komponente u izostavljanju drugih utjecaja tada određujemo po izrazu (30) (31)..

$$Y_l = Q_l \cdot \operatorname{tg}(\gamma_l - \varphi) \quad (30)$$

$$Y_d = Q_d \cdot \operatorname{tg}(\gamma_d + \varphi) \quad (31)$$

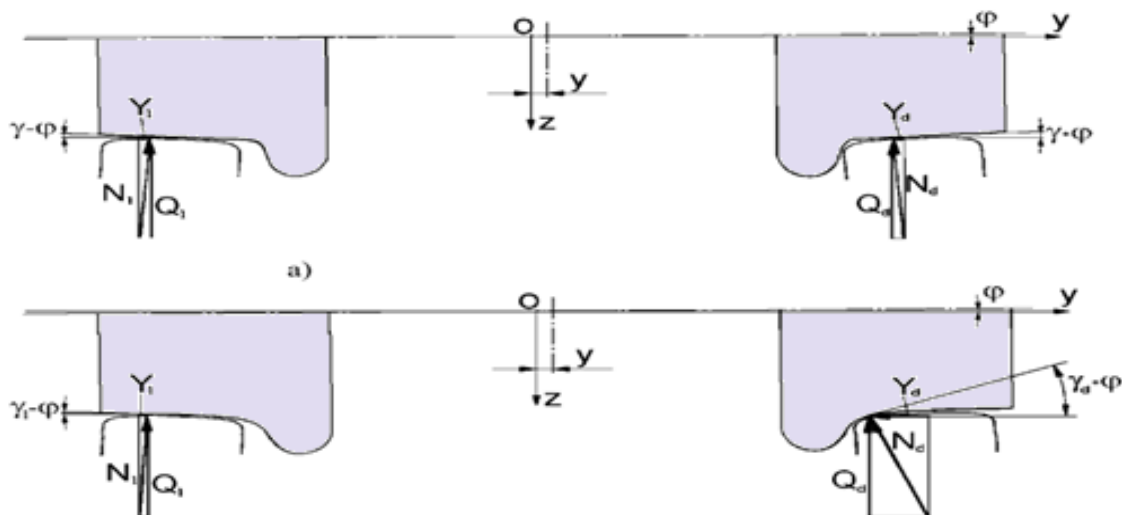
Rezultirajuća bočna reakcija ove dvije sile je (32):

$$Y = Y_l - Y_d = Q_l \cdot \operatorname{tg}(\gamma_l - \varphi) - Q_d \cdot \operatorname{tg}(\gamma_d + \varphi) \quad (32)$$

Smatramo da su opterećenja po točki približno jednako, odnosno (33):

$$Q_l \sim Q_d \sim Q_o \quad (33)$$

Sa slike 28 je vidljivo da ako se osigura stupnjevit prijelaz sa površine kotrljanja na vijenac, postiže se kontinuirana rastuća povratna sila i smanjuje vjerojatnost oštih bočnih udara o tračnicu, a time se značajno smanjuje proces trošenje profila vijenaca.

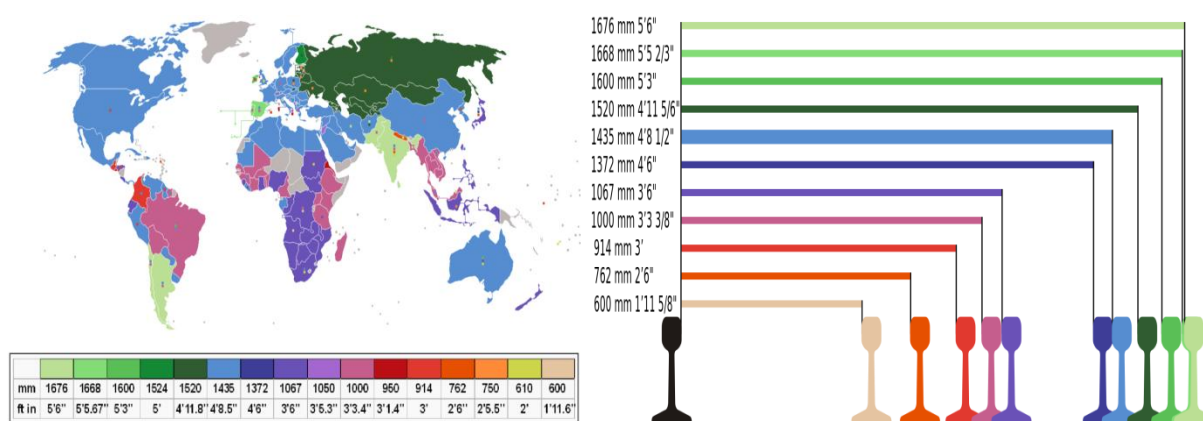


Slika 28. Utjecaj geometrije dodira na bočne komponente sile dodira trenja

a - konični profil, b - nekonični profil

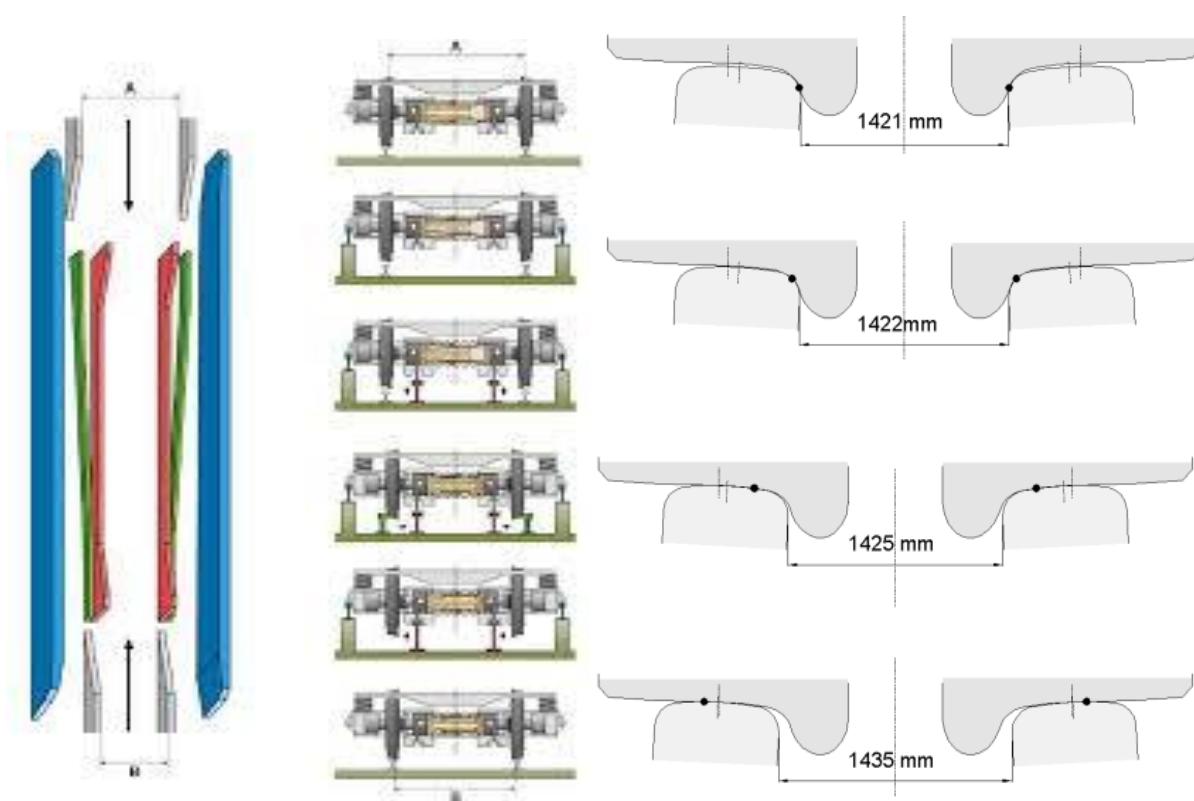
8.1.5 Trošenje vijenca kotača pri promijeni širine kolosijeka

Izbor određene širine kolosijeka ima svoje vojne, kao i ekonomske razloge. S vojne točke gledišta često bila briga da neprijatelj može koristiti željezničku mrežu za vlastite potrebe u slučaju rata. Zbog toga su se često namjerno birale drugačije širine kolosijeka, tako da je bio tehnički onemogućen prijenos vozila ili izgradnja trokolosiječne pruge. S ekonomske točke gledišta postajao je težnja da se spriječi interes konkurentskih tvrtki da se koriste istim prugama i time stvore svoju vlastitu infrastrukturu. Slikom 29 prikazana je usporedba širina kolosijeka za različite zemlje svijeta kao posljedica vojnih i ekonomskih razloga [17].



Slika 29. Različite širine kolosijeka u svijetu [19]

Suženje kolosijeka dovodi do porasta bočnih sila (slika 30), zbog činjenice da se dodir kotač - tračnica sa suženjem kolosijeka pomjera k vijencu kotača koji uvećava otpor kotrljanja, odnosno povećava se trenje, a time i trošenje profila vijenca kotača. Uvećani proces trošenja vijenca, u ovakvim slučajevima nastaje kada su vagoni natovareni teretom, a time rezultira vertikalnom silom na kotač i još više uvećava otpor kretanja, odnosno trošenje.



Slika 30. Porast bočnih sila kao posljedica porasta širine kolosijeka [17]

9. Provjera istrošenosti vijenca i profila kotača

9.1. Norma UIC 510 – 2

Provjera istrošenosti vijenca i profila kotača vrši se prema normi UIC 510 - 2 koja propisuje minimalne visine vijenca kotača prema promjeru kotača.

- Za promjer kotača između 760 i 1 000 mm: $h = 28$ mm,
- Za promjer kotača između 630 i 760 mm: $h = 30$ mm ili 32 mm ($h = 30$ mm je bolje iz financijskih razloga),
- Za promjer kotača između 330 i 630 mm: $h = 32$ mm.

Slikom 31 prikazana je mjerka pomoću koje se povjerava istrošenost i profila kotača vijenca monoblok kotača za određeni promjer prilikom postupka reprofiliranja.



Slika 31. Mjerka za kontrolu vijenca i profil kotača

Nije moguće dati konačne vrijednosti dok standardizacija nije završena. Sljedeće rasponi promjera su privremeni za kotače željezničkih vozila i vagona koji se korišteni na međunarodnoj razini.

Radi točnosti, navedene odredbe određuju da li se oni odnose na nominalni promjer D ili minimalni promjer d koji su prikazani tablicom 5.

Tablica 5. Vrijednosti nominalnog i minimalnog promjer kotača

Nominal promjer D (mm)	Minimalni promjer d (mm) ^a
1000	920
920	840
840	760
760	680
680	630
630	550
550	470
470	390
390	330

Mjerenje istrošenosti vijenca kotača vrši se pomoću mjerki za provjeru dimenzija samog vijenca i njegovog nagiba [20].

9.2. Mjerka za vijenac monoblok kotača

Mjerka za vijenca monoblok kotača(slika 32) se koristi za mjerenje UIC - ORE profila kotača s punim vijencem i stisnutim vijencem oko 2,5,10 i 15 mm.

S pomoću ove mjerke se mjere tri temeljne vrijednosti UIC - ORE profila

- Debljina vijenca - u razmaku od 10 mm iznad kruga kotrljanja
- Visina vijenca - od kruga kotrljanja
- Nagib vijenca – postavlja se u razmaku dviju točki na profil kotača, 2 mm ispod vrha vijenca i 10 mm iznad kruga kotrljanja. Udaljenost se mjeri od normalne razine do razine kruga kotrljanja

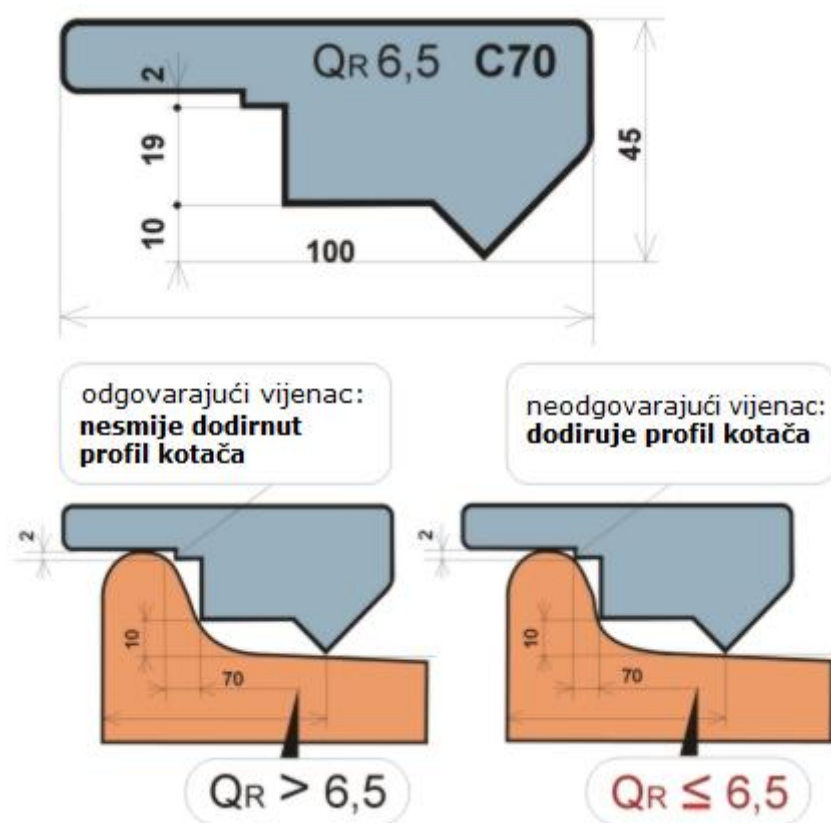
Ova mjerka je opremljena linearnom skalom i koristi se za mjerenje debljine naplatka kod kruga kotrljanja, pri čemu još razlikujemo i Q mjerku.



Slika 32. Mjerenje dimenzija profila kotača s punim i stisnutim vijencem pomoću mjerke

9. 3. Provjera nagiba vijenca

QR mjerka (slika 33) je namijenjena za brzu i jednostavnu provjeru nagiba vijenca kotača UIC - ORE profila u pogonu. Postavljenjem QR mjerke na profil kotača može se utvrditi dali je nagib vijenca odgovarajući ($Q_R \geq 6,5$ mm).

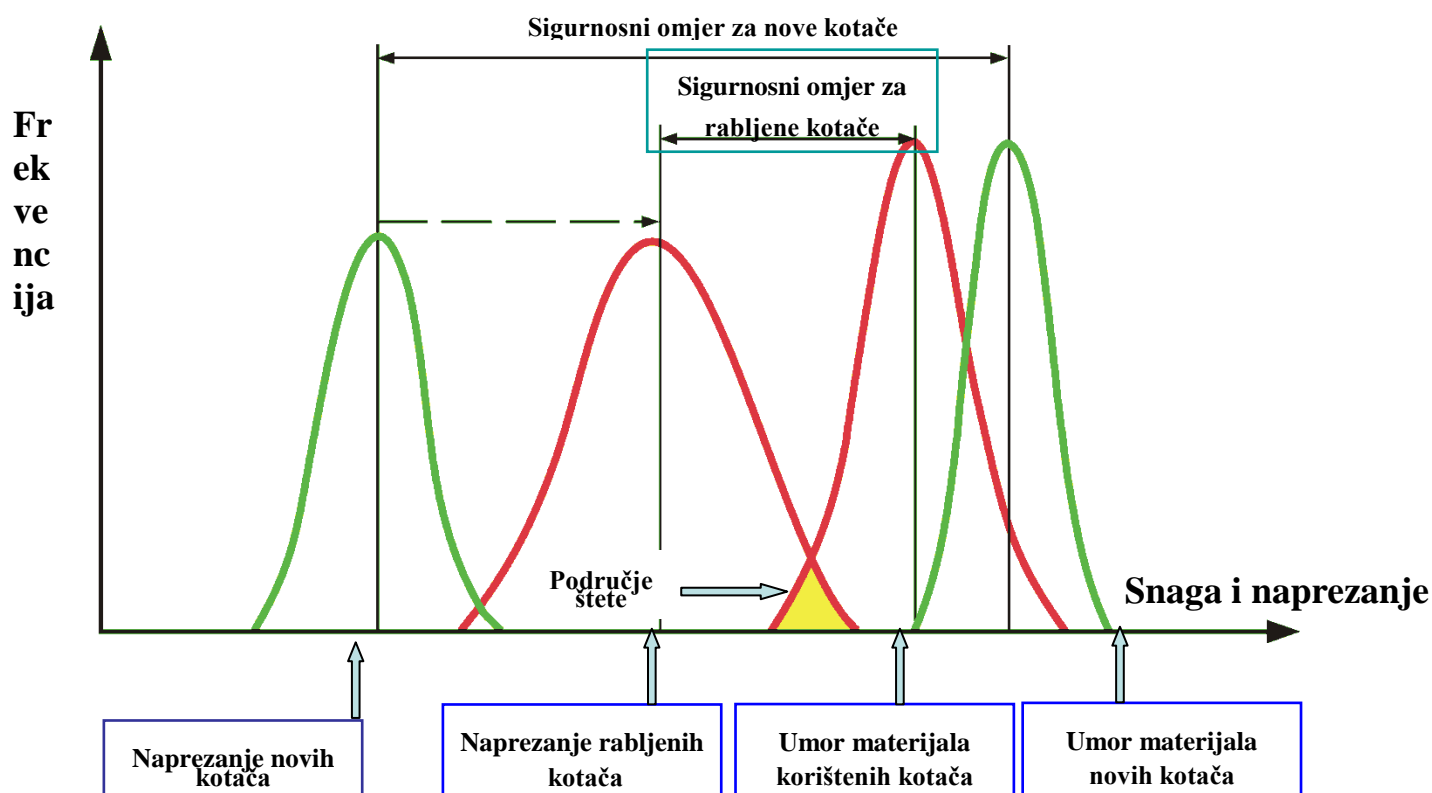


Slika 33. Provjera nagiba vijenca kotača pomoću QR mjerke [21]

10. TRAJNOST DIJELOVA KONSTRUKCIJE

Trajnost dijelova konstrukcije u ovom slučaju ovisi o raznim faktorima kao što su radno opterećenje, konstrukcija proizvoda, materijal, te izradi. Utjecaj ovih parametara jeste interaktivan, pa tako optimalno konstruiranje ovisi o utjecaju radnih opterećenja kao i o svojstvima materijala te kvaliteti izrade dijela. Na ponašanje dijela konstrukcije pod cikličkim opterećenjem utječu dinamička otpornost materijala, vrsta i raspodjela naprezanja, vrsta komponenata (dijela) te kvaliteta izrade i vanjski uvjeti rada.

Slikom 34 je prikazan dijagram usporedbe naprezanja i umora kod novih kotača u odnosu na rabljenne kotača ovisno o primjenjenom naprezanju i snazi vučnog vozila. Na osnovu toga može se zaključiti da su sama naprezanja te kao posljedica njega umor, znatno manji nego kod korištenih kotača.



Slika 34. Dijagram usporedbe naprezanja i umora kod novih kotača u odnosu na rabljene kotače ovisno o primjenjenom naprezanju i snazi vučnog vozila[22]

10.1 Alternativne metode smanjenja trošenja vijenca i profila kotača

10.1.1 Podmazivanje vijenca i glave monoblok kotača

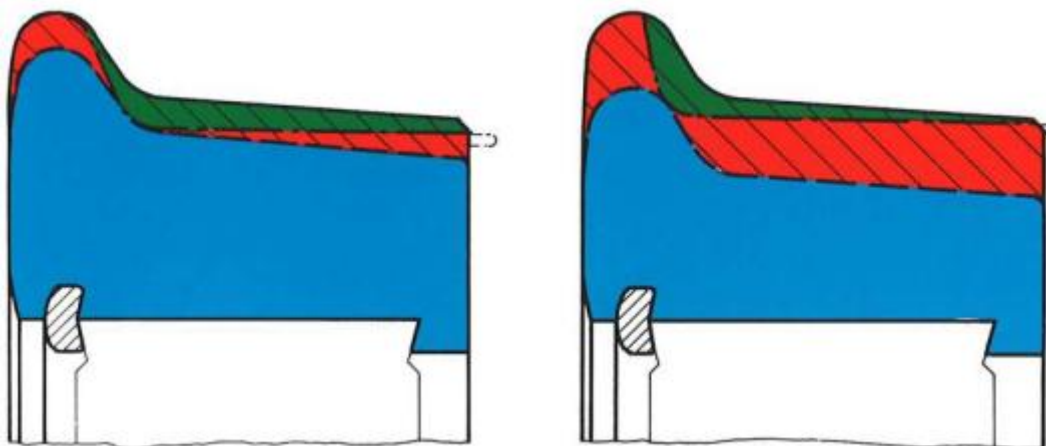
Jedan od načina podmazivanja vijenca monoblok kotača je FluiLub sustav održavanja vijenca i glave monoblok kotača (Slika 35). Kod željezničkih vozila trošenje kotača i same tračnice je veliki problem, zajedno s bukom koju uzrokuju. FluiLub sustav se bazira na principu korištenja tiksotropnog sredstva za podmazivanje s visokim sadržajem krutih tvari predstavlja rješenje tog problema. Problemi trošenja vijenca i tračnica uzrokovani trenjem su poznati. Međutim, troškovi održavanja tračnica i kotača mogu se uz malo truda pomoću uređaja za podmazivanje vijenca kotača značajno smanjiti.



Slika 35. Podmazivanje vijenca kotača pomoću FluiLub sustava

Uređaj zahtijeva kako komprimirani zrak tako i kontrolu električne struje. Uređaj za podmazivanje pošprica, u fiksnim intervalima, određenu količinu specifičnog ulja na vijenac monoblok kotača pomoću elektronsko upravljanim ili fiksnim intervalima. (Uređaj ne radi, kada vozilo miruje).

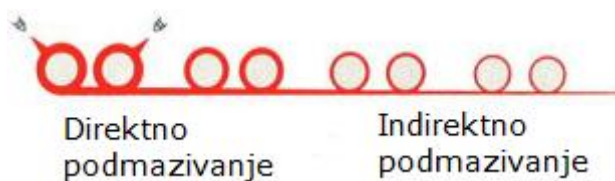
Na taj način se na vijencu i gaznom sloju glave kotača stvara sloj koji smanjuje odnosno usporava njihovo trošenje. Slikom 36 prikazana je usporedba podmazanog (lijevo) i nepodmazanog (desno) vijenca kotača iz čega je vidljivo da kod primjene FluiLub sustava trošenje osnovnog materijala mnogo manja.



Slika 36. Podmazan (lijevo) i nepodmazan (desno) vijenac kotača

Mehanizam podmazivanja

- Od malznice na vijenac monoblok kotača
- Od vijenca monoblok kotača na tračnicu
- Od tračnice na vijenac



Slika 37. Razlika direktnog i indirektnog podmazivanja

Uređaj za podmazivanje vijenca monoblok kotača ima sljedeće izravne prednosti kao što su smanjenje trošenja obruča kotača, smanjenje trošenja i deformacija tračnica, smanjenje otpora kotrljanju te smanjenje opasnosti od iskliznuća, s obzirom da je koeficijent trenja smanjen a kao posljedica toga i otpor kotrljanja. U pogledu akustike eliminira se cviljenje kotača.

Na osnovu navedenih prednosti postižu se sljedeće indirektno prednosti kao što su:

Smanjenje:

- Troška ponovnog profiliranja vijenca kotača i tračnica
- Troška za zamjenu (naknadu) potrošenog materijala

Povećanje

- Sigurnosti
- Udobnosti u vožnji za putnike [23].

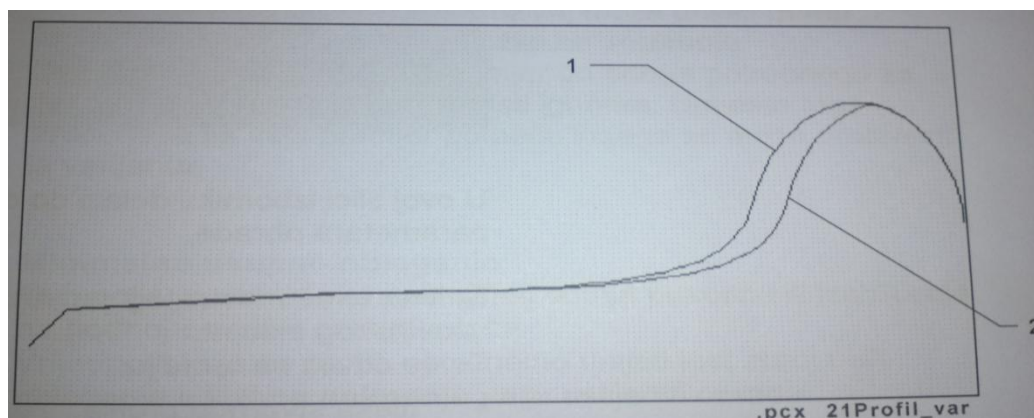
10.1.2 Tokarenje vijenca i glave monoblok kotača

Tokarenje vijenca monoblok kotača pomoću portalnog tokarskog stroja PN 190 NSH za obradu profila kotrljanja i diskova (reprofiliranje) čije su karakteristike prikazane u tablici 6.

Tablica 6. Karakteristike portalnog tokarskog stroja za obradu profila kotrljanja i diskova PN 190 NSH

Karakteristike	Iznos
Tip stroja	PN 190 NSH
Broj stroja	101 435
Godina proizvodnje	2008
Proizvođač	Hegenscheidt – MFD GmbH & Co. KG

Svaki zadani profil pohranjen je kao matematički opis. Kako bi se uštedio materijal prilikom ponovnog profiliranja tj. kako bi se povećao hodni učin osovinskog sklopa, vijenac kotača se ne proizvodi ponovno u cjelokupnoj debljini vijenaca kotača, nego u reduciranoj debljini, pri čemu se govori o "slabljenju vijenca kotača". Profil proizveden na taj način označava se kao "varijanta" izvornog zadanog profila. Slikom 38 prikazana je usporedba zadanog profila (1) i varijante (2).



Slika 38. Usporedba zadanog profila i varijante

Prilikom "izračuna" generira se popis mogućih varijanti. Parametri potrebni za to unose se u izbornik "izračun". Međutim, ako poslužitelj želi neki drugi promjer od onog predloženog u popis varijanti onda se može unjeti pod predhodno zadanim vrijednostima novi zadani promjer pa mekanom tipkom "OK" iznova pokrenuti izračun te tako odrediti podatke o obradi uz taj promjer.

Sam postupak se sastoji od unosa podataka preko tipkovnice za unos podataka uz odabir modusa obrade (poluautomatski ili potpuno automatski). Slijedeći korak je odabir pojedinačnih radnih koraka poluautomatskim ili potpuno automatskim redosljednom nakon čega se vrši uprezanje s odabirom vrste zatezanja. Nakon toga se vrši pregled predhodne izmjere s odabirom mjernih parametara.

Izračun s opcionalnim unosom područja varijanata, zadanog promjera i minimlanog ukupnog oblaganja, gdje poslužitelj dobiva informacije iz izračuna izmjera i obrade s opcionalnim unosom zadanog promjera, širine kolosijeka i debljine vijenca kotača te također informacije za poslužitelja u pogledu strugotine, naknadnim izmjerama te opuštanju. Slikom 39 je prikazana opslužna ploča sa zaslonom sustava, mekanim tipkama za unos podataka i pločom za upravljanje strojem



Slika 39. Glavna opslužna ploča

Ovakva tehničko - tehnološka intervencija je vrlo skupa i neekonomična, s obzirom na to da se ovo može izvesti samo dva do tri puta, za svog eksploatacionog vijeka, imajući u vidu ograničenje nazivnog prečnika točka.

Slikom 40 prikazan je postupak obrade profila kotrljanja i vijenca monoblok kotača pomoću portalnog tokarskog stroja PN 190 NSH u tvornici željezničkih vozila TŽV Gredelj d.o.o. [24].



Slika 40. Obrada profila kotrljanja i vijenca monoblok kotača pomoću portalnog tokarskog stroja

PN 190 NSH

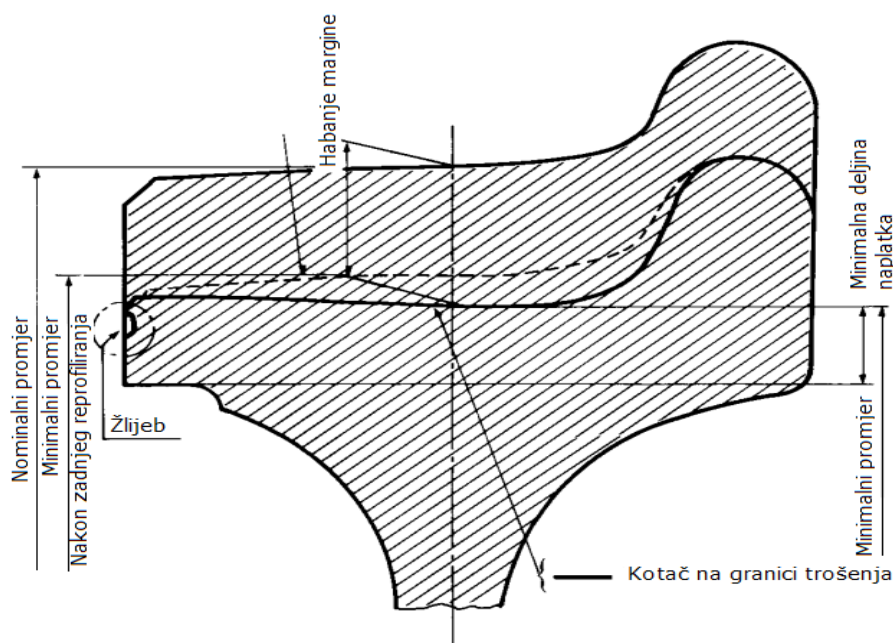
Smanjenje promjeraa kotača profiliranjem, četiri do pet puta veće od veličine trošenja površine kotrljanja tijekom procesom eksploatacije (34):

$$\Delta r_o = \frac{4}{5\Delta r_h} \quad (34)$$

Na prugama željezničkih uprava uglavnom dominiraju pruge sa dosta zavoja, razlog za reprofiliranjem je, ili dostignuta minimalna q_R mjera, ili dostignuta minimalna debljina vijenca. U uvjetima loše geometrije dodira, lošeg stanja kolosijeka i pri odsustvu ili nedovoljnom podmazivanju vijenca kotača ili bokova tračnica u zavoјima, broj priјeđenih kilometara između dvije obrade je često veoma mali.

Na isključivo ravničarskim prugama razlog reprofiliranja može biti suviše velika visina vijenca koja nastaje dominantnim trošenjem profila kotača na površini kotrljanja.

Kod nekih europskih željeznica sa veoma dobrim prugama, razlog reprofiliranja može biti i nastanak olučastog udubljenja na gazećoj površini koji stvara „lažni vijenac“ čija je posljedica dodira kotača i tračnice u jednoj vrlo uskoj zoni. Sa povećanjem prijeđenog broja kilometara između dva reprofiliranja na takvim prugama značajno raste prisutnost ravnih mjesta, ljuaskanja površine kotrljanja, nastanak mikropukotina, odvajanja materijala i drugih oštećenja usljed umora na gaznoj površini kotača. U slučaju kada se obrada vrši usljed velike visine vijenca ili drugih oštećenja na gaznoj površini, količina skinutog materijala pri obradi je relativno mala. U slučaju kada se obrada vrši usljed male debljine vijenca ili male mjere q_R količina skinutog materijala je utoliko veća ukoliko su spomenute dvije mjere manje, pošto se dobijanje početnog (punog) profila može postići samo značajnim smanjenjem promjera točka. Profil s minimalno dopuštenim promjerom usljed posljednjeg reprofiliranja prikazan je slikom 41 [23].

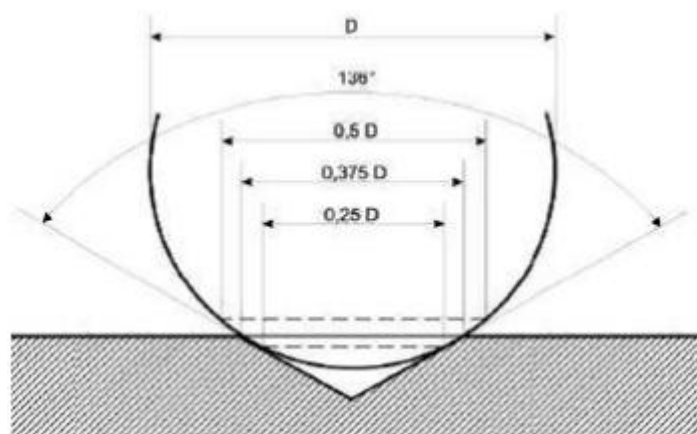


Slika 41. Profil s minimalno dopuštenim promjerom usljed posljednjeg reprofiliranja

Sam postupak reprofiliranja se provodi po Normi UIC 510 – 2 pomoću koje se definira i reguliranja dimenzije kotača kao što su profil kotača tako i vijenca na osnovu promjera monoblok kotača [20].

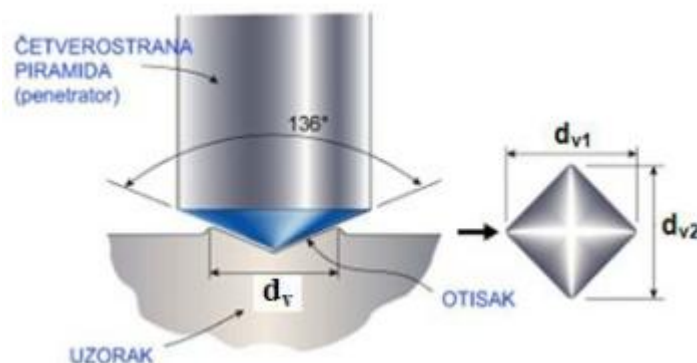
11. VICKERSOVA TVRDOĆA

Tvrdoća čelika najčešće se mjeri Vickersovom ili Knoopovom metodom. Vickersovom metodom moguće mjeriti i najtvrdje materijale, a tvrdoća izmjerena s opterećenjima većim od 49,03 N nije ovisna o primijenjenoj sili utiskivanja. To se postiže uporabom dijamantnog indentora u obliku jednakostrane četverostrane piramide s kutom između stranica od 136° . Ovakav kut nije odabran nasumce, već zbog činjenice da takva geometrija indentora jamči vrijednosti makrotvrdoće neovisne o primijenjenom opterećenju. Ovo je važno jer se tvrdoća mekih i tvrdih materijala može mjeriti primjenom iste sile, kao što se tvrdoća istog materijala može mjeriti s različitim opterećenjima. Kut od 136° zatvaraju tangencijalne ravnine na Brinellovu kuglicu pri optimalnoj veličini otiska $d_b = 0,375 \cdot D$ (slika 42).



Slika 42. Prikaz izbora kuta od 136° [24]

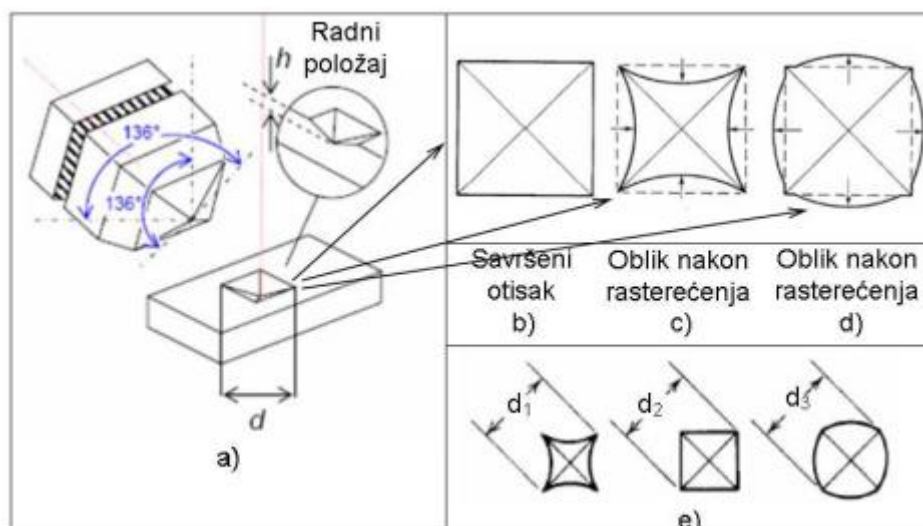
Utiskivanjem Vickersovog indentora u materijalu ostaje otisak oblika šuplje piramide, slika 43.



Slika 43. Utiskivanje Vickersovog indentora i izgled otiska [25]

Kod Vickersove metode tvrdoća se računa na osnovi veličine otiska. Pomoću mjernog mikroskopa potrebno je izmjeriti veličinu dijagonala d_1 i d_2 kvadratne baze piramide otisnute u materijalu. Otisak koji ostavi Vickersova piramida nije uvijek idealnog kvadratnog oblika, već može doći do njegova iskrivljenja uzrokovanog elastičnim efektom.

Na slici 44c prikazan je otisak koji je deformiran uslijed elastičnog povrata nakon rasterećenja čime je došlo do njegova skupljanja. Na slici 44d otisak je također deformiran, ali u ovom slučaju proširen uslijed plastične deformacije materijala. Stoga otisci Vickersovog indentora mogu biti jednakih dijagonala, ali bitno različitih površina ($d_1 = d_2 = d_3$; $S_1 < S_2 < S_3$), slika 44e.



Slika 44. Geometrija Vickersove piramide i mogući oblici otisaka nakon rasterećenja [26]

Po definiciji, tvrdoća po Vickersu izražava se izrazom (35):

$$\text{Vickersova tvrdoća} = \text{Konstanta} \cdot \frac{\text{Ispitna sila}}{\text{Površina otiska}} \quad (35)$$

gdje konstanta predstavlja recipročnu vrijednost ubrzanja Zemljine sile teže (36):

$$\text{Konstanta} = \frac{1}{q_n} = \frac{1}{9,980665} \approx 0,102 \quad (36)$$

Stoga Vickersovu tvrdoću opisuje sljedeća jednadžba (37):

$$HV = \frac{F \cdot 0,102}{s} = \frac{1}{9,980665} \approx 0,102 \quad (37)$$

pri čemu je:

- F [N] – ispitna sila,
- S [mm²] – površina šuplje piramide otisnute u materijalu.

Kada se površina otisnuća izrazi pomoću veličine dijagonale baze otiska Vickersova tvrdoća slijedi iz izraza (38):

$$\text{Vickersova tvrdoća} = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d_{Vsr}^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d_{Vsr}^2} \quad (38)$$

pri čemu je:

- F [N] – ispitna sila,
- d_{Vsr}^2 [mm] – srednja vrijednost dvije izmjerene dijagonale baze otiska.

Primijenjena sila kod Vickersove metode može se kretati u rasponu od 49,03 N (5 kp) do 980,07 N (100 kp). U određenim uvjetima može se primijeniti i manja sila. Mikrotvrdomjeri koji rade po Vickersovoj metodi raspolažu silama utiskivanja od 0,09807 N (0,01 kp) do 0,9807 N (0,1 kp). Ukoliko se opterećenje kreće u rasponu od 1,961 N do uključivo 49,03 N, radi se o semi-mikrotvrdoći. Mjerenje semi-mikrotvrdoće provodi se prvenstveno pri ispitivanju tanjih uzoraka i prevlaka. Nadalje, primjenom malih sila utiskivanja moguće je mjeriti tvrdoću pojedinih zrna (kristala). Tada se govori o mikrotvrdoći.

Za mjerenje mikrotvrdoće primjenjuju se opterećenja manja od 1,961 N. Tada za mjerenje veličine otiska nije dovoljno mjerno povećalo već mjerni mikroskop koji povećava nekoliko stotina puta.

Tablica 7. Vrijednosti sila opterećivanja kod Vickersove metode

Konvencionalna tvrdoća ¹⁾		Semi-mikrotvrdoća		Mikrotvrdoća ²⁾	
Oznaka	Ispitna sila F [N]	Oznaka	Ispitna sila F [N]	Oznaka	Ispitna sila F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807
¹⁾ Može se primijeniti ispitna sila veća od 980,7 N					
²⁾ Ispitna sila za mikrotvrdoću je preporučena					

Tvrdoća izmjerena po Vickersu općenito se označava simbolom HV uz koji se navodi i veličina primijenjenog opterećenja u k_p . Vrijeme potrebno da se ispitni uzorak potpuno optereti ispitnom silom ne smije biti manje od 2 s niti veće od 8 s. Brzina kojom se indenter primiće ispitnoj površini ne smije biti veća od 0,2 mm/s. Mjerenje se provodi pri temperaturi 10 °C do 35 °C, dok optimalni uvjeti ispitivanja podrazumijevaju temperaturu od 23±5 °C. Za vrijeme mjerenja ne smije biti nikakvih vibracija. Kod više uzastopnih mjerenja, razmak između središta dva susjedna otisaka mora biti trostruko veći od srednje dijagonale otiska (d_v), kako bi se izbjeglo mjerenje u već očvrstnutom dijelu materijala. Ovo vrijedi za čelike, bakar i bakrene legure, dok u slučaju lakih metala, olova, kositra i njihovih legura otisci moraju biti razmaknuti minimalno $6 \times d_v$. Debljina ispitnog uzorka mora iznositi barem $1,5 \times d_v$. Ispitna površina na kojoj se provodi mjerenje treba biti brižljivo pripremljena, grubo i fino brušena te polirana. Ispitivanje tvrdoće po Vickersu propisano je, temeljem Zakona o normizaciji, normom HRN EN ISO 6507-1:2000 [27].

12. EKSPERIMENTALNI DIO

12.1 Uvod

U eksperimentalnom dijelu rada želi se pokazati kako samo trošenje varira ovisno o vrijednosti tvrdoće. Stoga su provedena ispitivanja tvrdoće na uzorku vijenca monoblok kotača koji je metalografski obrađen kako bi se ispitala mikrostruktura s ciljem utvrđivanja same vrste materijala te dali je došlo do promijene kemijskog sastava i tvrdoće uzorka. Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja i njihove analize pokušat će se odrediti promijena mehaničkih svojstava materijala te njezin utjecaj na vrijednost tvrdoće.

12.2 Plan eksperimenta

Eksperimentalni dio rada sadrži mjerenje tvrdoće nepoznatog materijala ispitnog uzorka Vickersovom metodom. Ova se mjerenja provode u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Zavod za materijale. Zato se uzorak brusi brusnim papirima različite kvalitete te polira. Svi dobiveni rezultati statistički su obrađeni i detaljno analizirani.

12. 3 Provedba pokusa

12.3.1 Izrezivanje uzorka

Izrezivanje istrošenog uzorka profila monoblok kotača prikazanog slikom 45 provedeno je u tvornici željezničkih vozila TŽV Gredelj d.o.o. korištenog kod okretnih postolja Y25 vučnih i vučenih vozila (Dizel i elektolokomotive).



Slika 45. Monoblok kotač s istrošenim vijencem

Prilikom izrezivanja priprema monoblok kotača pomoću pile, došla je do izražaja izrazita žilavost samog materijala kotača. Pri čemu valja napomenuti da je trebalo odediti potrebnu debljinu samog primjerka prilikom samog postupka izrezivanja, kako nebi došlo do deformacija i prevelikog zagrijavanja koje bi uzorkovalo stvaranje zaostalih toplinskih naprezanja što bi utjecalo na samu strukturu ispitnog uzroka, što je naravno relevantno s obzirom na sljedna ispitivanja.

Slikom 46 je prikazan izrezani uzorak sa deformacijama u području lista, posebno izraženih na rubovima nastale usljed samog izrezivanja.



Slika 46. Deformacije monoblok kotača u području lista prilikom izrezivanja uzorka

Nakon toga je naknadno pilom izrezan vijenac monoblok kotača na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za materijalografska ispitivanja (slika 47) na kojem će se provesti ispitivanja u pogledu mjerenja tvrdoće te određivanja mikrostrukture.



Slika 47. Izrezani vijenac monoblok kotača

12.3.2 Priprema uzorka

Za potrebe planiranih ispitivanja potrebno je uzorak pripremiti. Priprema uzorka jedan je od najvažnijih čimbenika za dobivanje valjanih rezultata mjerenja. Pod pripremom se podrazumijeva brušenje i poliranje po točno razrađenim postupcima prilagođenim posebno svakom materijalu.

Na početku procesa pripreme uzorak se zalijeva u polimernu masu (slika 48) kako bi se njime lakše rukovalo. Samo zalijevanje se vrši na hladno tako da se masa ulijeva kalup u kojem se nalazi uzorak. Nakon što odstoji 20 minuta tako zaliveni uzorak može se dalje pripremati.



Slika 48. Zaliveni uzorak

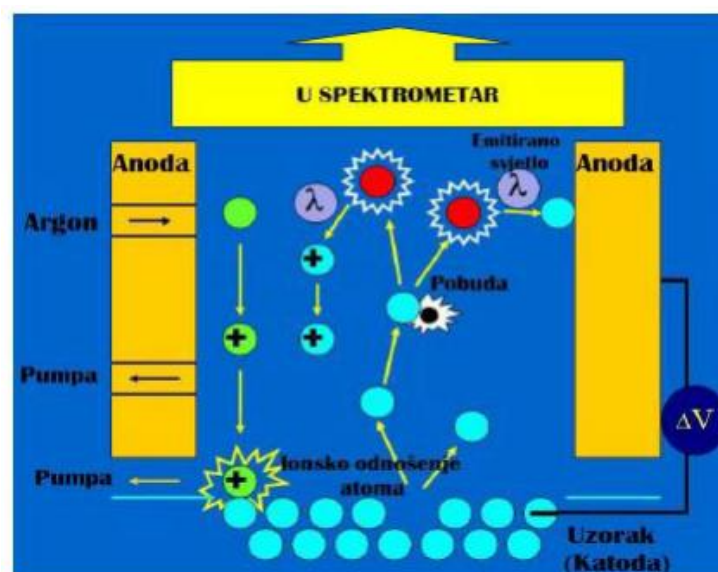
12.3.3 Određivanje kemijskog sastava uzorka

Slijedeći korak je bio odrediti kemijski sastav ispitnog uzorka pomoću optičke emisijske spektrometrije s tinjajućim izbojem (GD-OES – Glow Discharge Optical Emission Spectrometry). Na slici 49 prikazana je unutrašnjost uređaja GDS 850A Leco, na kojem se vršilo ispitivanje.



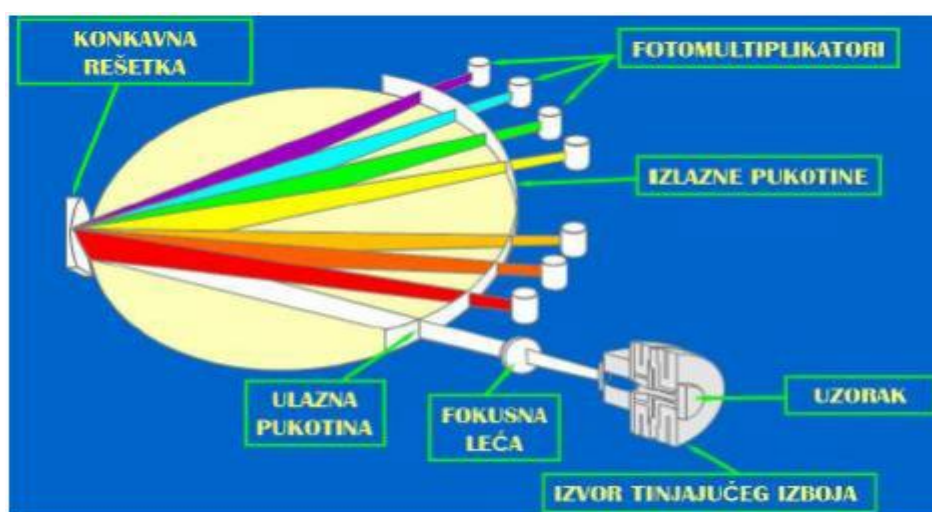
Slika 49. Unutrašnjost uređaja GDS 850, Leco

Da bi se napravila analiza potrebno je pobuditi atome što se postiže tinjajućim izbojem, odnosno plazmom. Plazmu čini ionizirani plemeniti plin argon. Ionizirani plin skida površinski sloj s površine ispitnog uzorka koji zatim disocira na atome te dalje slijedi pobuda tih atoma u plazmi. Elektroni u pojedinom atomu iz osnovnog stanja prelaze u pobuđeno stanje tj. prelazi na viši energetske nivo, a nakon 10 ns, elektron se vraća u početno stanje tj. prelazi na niži energetske nivo pri čemu se oslobađa energija koja se emitira u obliku svjetlosnog fotona (slika 50).



Slika 50. Mehanizam pobude atoma uzorka kod GD-OES analize [28].

Ta energija, kao i valna duljina emitiranog svjetla, specifična je za svaki atom, odnosno kemijski element. Na taj način omogućena je identifikacija atoma. Intenzitet svjetla ukazuje na udio pojedinog kemijskog elementa u uzorku. Svjetlost nastala u navedenom procesu prolazi kroz spektrometar i koristi se za analizu. Svjetlost najprije prolazi kroz primarnu pukotinu, zatim dolazi na rešetku i reflektira se pod određenim kutom koji ovisi o valnoj duljini te zatim prolazi kroz sekundarnu pukotinu na fotomultiplikator (slika 51).



Slika 51. Shematski prikaz spektrometra u GD-OES uređaju [29].

U spektrometru može biti postavljeno mnogo fotomultiplikatora sa sekundarnom pukotinom kako bi se istovremeno moglo analizirati veći broj elemenata u uzorku. Uzorak mora biti vodljiv, kako bi se mogao koristiti kao katoda. Uzorci, kao što su metalni oksidi, mogu se analizirati tako da se sa uzorka uzme strugotina i pomiješa sa metalnim prahom, najčešće sa Cu. Kako bi se mogli analizirati nepoznati uzorci, potrebna je analitička metoda, koja daje korelaciju između udjela pojedinog elementa i mjerenog inteziteta. Iz tog razloga, potrebno je prije analize uređaj kalibrirati sa standardnim uzorcima čiji je kemijski sastav poznat i točno određen (u tu svrhu se koriste ili certificirani referentni materijali ili referentni materijali).[21]. Kemijski sastav materijala određenog pomoću GD-OES uređaja prikazan je tablicom 8.

Tablica 8. Kemijski sastav materijala uzorka

oznaka uzorka	%									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
2	0,99	0,32	0,77	0,012	0,006	0,23	0,02	0,013	0,05	ostatak

12.3.4. Mjerenje tvrdoće

12.3.4.1 Ispitni uzorak

Sva mjerenja tvrdoće su provedena na uzorku koji je zaliven u kalup polimernom masom kako bi se njime lakše rukovalo. Tvrdoća se mjerila Vickersovom - ovom metodom s opterećenjem (HV 0,2) utegom od 200 g.

12.3.4.2 Mjerni uređaj

Za potrebe mjerenja tvrdoće korišten je tvrdomjer proizvođača Zwick, čije su osnovne karakteristike prikazane tablicom 9.

Tablica 9. Osnovne karakteristike tvrdomjera

Proizvođač	Zwick (Njemečka)
Tip	3212001
Serijski broj	115696
Metoda mjerenja	Analogna
Masa	oko 50 kg
Dimenzije	600 x 400 x 350
Vrijeme utiskivanja	0...10 s
Maksimalna visina mjernog uzorka	300 mm
Opterećenja	od 0,09807 N (0,01 kp) do 98,067 N (10 kp)
Povećanja	100x / 400x

Na slici 52 prikazan je tvrdomjer s osnovnim dijelovima.



Slika 52. Tvrdomjer - Zwick

Radni stol služi za prihvat ispitnog uzorka. Sadrži dva utora pomoću kojih se uzorak, prema potrebi, može učvrstiti. Mikrometarskim vijcima omogućeno je pomicanje radnog stola u x i y smjeru. Osim toga moguće je i zakretanje radnog stola za određeni kut. Opterećenja koja se postižu kombinacijom utega različitih masa mogu varirati od 0,09807 N (0,01 kp) do 98,067 N (10 kp). Masa samog cilindra zajedno s indenterom iznosi 200 grama tako da je na ovaj način moguće ostvariti opterećenja veća ili jednaka od 1,961 N.

Optički mjerni mikroskop koji se nalazi u sklopu tvrdomjera služi za povećanje otiska i mjerenje dijagonala otiska. Za tu svrhu na raspolaganju je okular povećanja 10 puta i dva objektiva povećanja 10 i 40 puta. Time ukupno povećanje mjernog mikroskopa iznosi 100 odnosno 400 puta.

Mjerni mikroskop i sustav za opterećivanje čine jednu cjelinu povezanu u stup koji se može okomito pozicionirati ovisno o veličini uzorka, ali i zakretati lijevo/desno čime je omogućeno utiskivanje indentora u ispitni uzorak te mjerenje veličine otiska.

Princip mjerenja na ovom tvrdomjeru je sljedeći :

- utezi odgovarajućih masa postavljaju se na cilindar ili polužnu vagu sustava za opterećivanje;
- laganim spuštanjem ručice za opterećivanje indentor se utiskuje u ispitivani materijal;
- Polaganim otpuštanjem izbjegavaju se nagli udari utiskivača u površinu uzorka, što može štetno utjecati na točnost mjerenja.;
- nakon utiskivanja sustav za opterećenje se pomiče u desno kako bi na njegovo mjesto došao mjerni mikroskop;
- pomoću mjernog mikroskopa, uporabom odgovarajućeg povećanja, pronalazi se otisak;
- donji vrh otiska postavlja se na jednu od nepokretnih linija mjerne skale;
- linija koja je najbliža gornjem vrhu otiska i leži sa njegove donje strane okretanjem mikrometarskog vijka dovodi se na sam vrh;

Nakon što su očitane vrijednosti d_1 i d_2 otiska nastalog utiskivanjem penetratora pomoću formule (39):

$$(d_2 - d_1) \cdot 0.302 \quad (39)$$

Određena je vrijednost d pomoću koje se iz tablice (slika 53) za opterećenje od 200 g očitala tvrdoća po Vickersu HV0,2

Videtur IV									
d	0	1	2	3	4	5	6	7	8
in									
19	1027	1017	1006	996	985	975	965	955	946
20	937	918	909	900	891	883	874	864	857
21	841	833	825	817	810	802	795	788	780
22	766	759	753	746	739	733	726	720	713
23	701	695	689	683	677	672	666	660	655
24	644	639	633	628	623	618	613	608	603
25	593	589	584	579	575	570	566	562	557
26	549	544	540	536	532	528	524	520	516
27	509	505	501	498	494	490	487	483	479
28	473	470	466	463	460	457	453	450	447
29	441	438	435	432	429	426	423	420	418
30	412	409	407	404	401	399	396	394	391
31	386	383	381	379	376	374	371	369	366
32	362	360	358	355	353	351	349	347	345
33	341	339	336	334	332	330	329	327	325
34	321	319	317	315	313	310	308	306	304
35	303	301	299	298	296	294	293	291	289
36	286	285	283	281	280	278	277	275	274
37	271	269	268	267	265	264	262	261	260
38	257	255	254	253	252	250	249	248	246
39	244	243	241	240	239	238	237	235	234
40	232	231	229	228	227	225	224	223	222
41	221	220	218	217	216	215	213	212	211
42	210	209	207	206	205	204	203	202	202
43	201	200	199	198	197	196	195	194	193
44	192	191	190	189	188	187	186	185	184
45	183	182	182	181	180	179	178	177	176
46	175	175	174	173	172	172	171	170	169
47	168	167	166	166	165	164	164	163	162
48	161	160	160	159	158	158	157	156	155
49	154	154	153	153	152	151	151	150	149
50	148	148	147	147	146	145	144	144	143
51	143	142	141	141	140	140	139	139	138
52	137	137	136	136	135	135	134	133	133
53	132	132	131	131	130	130	129	128	128
54	127	127	126	126	125	125	124	124	123
55	123	122	122	121	121	120	120	119	119
56	118	118	117	117	117	116	116	115	115
57	114	114	113	113	113	112	112	111	111
58	110	110	109	109	109	108	108	107	107
59	107	106	106	105	105	105	104	104	103
60	103	103	102	102	102	101	101	101	100

Slika 53. Tablica za očitovanje tvrdoće po Vickersu za optrećenje utegom od 200g

12.3.4.3 Rezultati mjerenja tvrdoće po Vickersu

Mjerenje su provedena u sredini i na rubovima kako bi se ustvrdio utjecaj toplinske obrade i samog trošenja na tvrdoću izrezanog uzorka, tj. za sredinu i po rubovima.

Sredina uzorka

U tablici 10 su navedeni pojedinačni rezultati mjerenja vrijednosti dijagonala vrijednosti d_1 (lijevi vrh) i vrijednosti d_2 (desni vrh) uzorka materijala Vickersovom metodom za sredinu uzorka.

Tablica 10. Izmjerene vrijednosti dijagonala otiska za sredinu uzorka

Sredina uzorka		
Redni br. mjerenja	Vrijednosti dijagonala otiska	
	Lijevi vrh, d_1 (mm)	Desni vrh, d_2 (mm)
1	334	463
2	358	461
3	342	459

Rezultati tvrdoće po Vickersu za sredinu uzorka očitane iz tablice za tvrdoće HV 0,2 dane su u tablici 11.

Tablica 11. Vrijednosti tvrdoće po Vickersu za sredinu uzorka nakon očitovanja iz tablice za HV 0,2

Sredina uzorka	
Redni br. mjerenja	Tvrdoća HV 0.2
1	244
2	383
3	298
Aritmetička sredina ($\bar{x}_{s.u.}$)	308.33
Varijanca ($\sigma_{s.u.}$)	57.214

Rub uzorka

U tablici 12 također su navedeni pojedinačni rezultati mjerenja vrijednosti dijagonala vrijednosti d_1 (lijevi vrh) i vrijednosti d_2 (desni vrh) uzorka materijala Vickersovom metodom za rub uzorka.

Tablica 12. Izmjerene vrijednosti dijagonala otiska za rub uzorka

Rubovi uzroka		
Redni br. mjerenja	Vrijednosti dijagonala otiska	
	Lijevo vrh, d_1 (mm)	Desno vrh, d_2 (mm)
1	305	444
2	315	458
3	319	451

Rezultati vrijednosti tvrdoće po Vickersu za sredinu uzorka očitane iz tablice za tvrdoće HV 0,2 dane su u tablici 13.

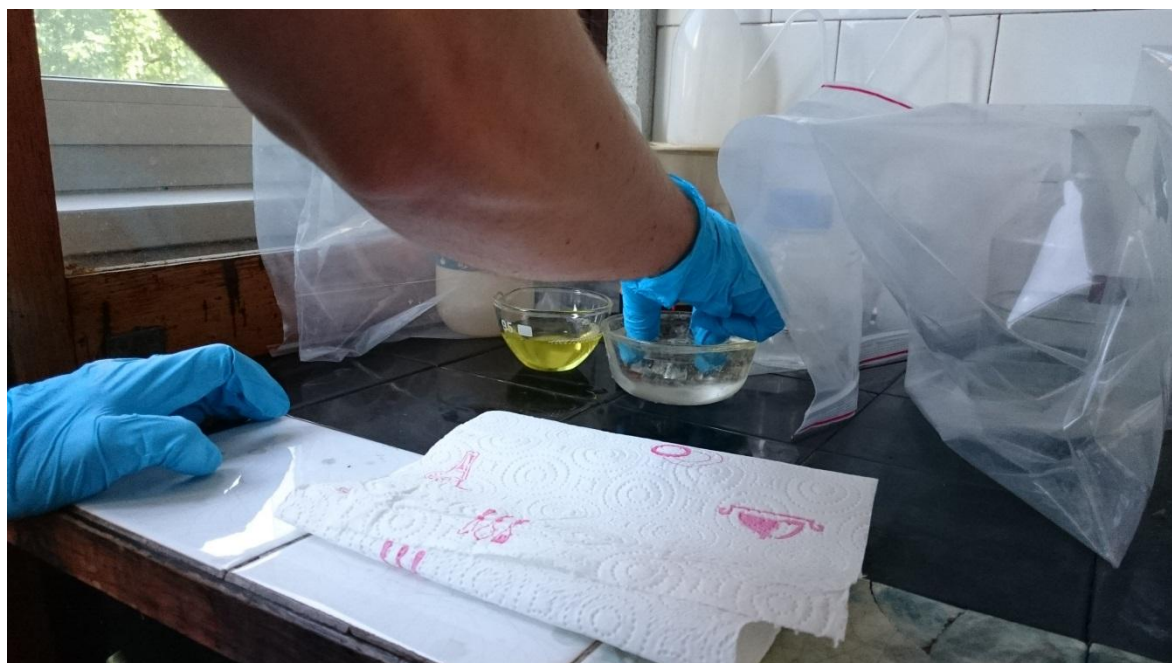
Tablica 13. Vrijednosti tvrdoće po Vickersu za rub uzorka nakon očitovanja iz tablice za HV 0,2

Rubovi uzroka	
Redni br. mjerenja	Tvrdoća HV 0.2
1	211
2	199
3	233
Aritmetička sredina ($\bar{x}_{r.u.}$)	214.33
Varijanca ($\sigma_{r.u.}^2$)	14.079

12.3.5. Određivanje mikrostrukture

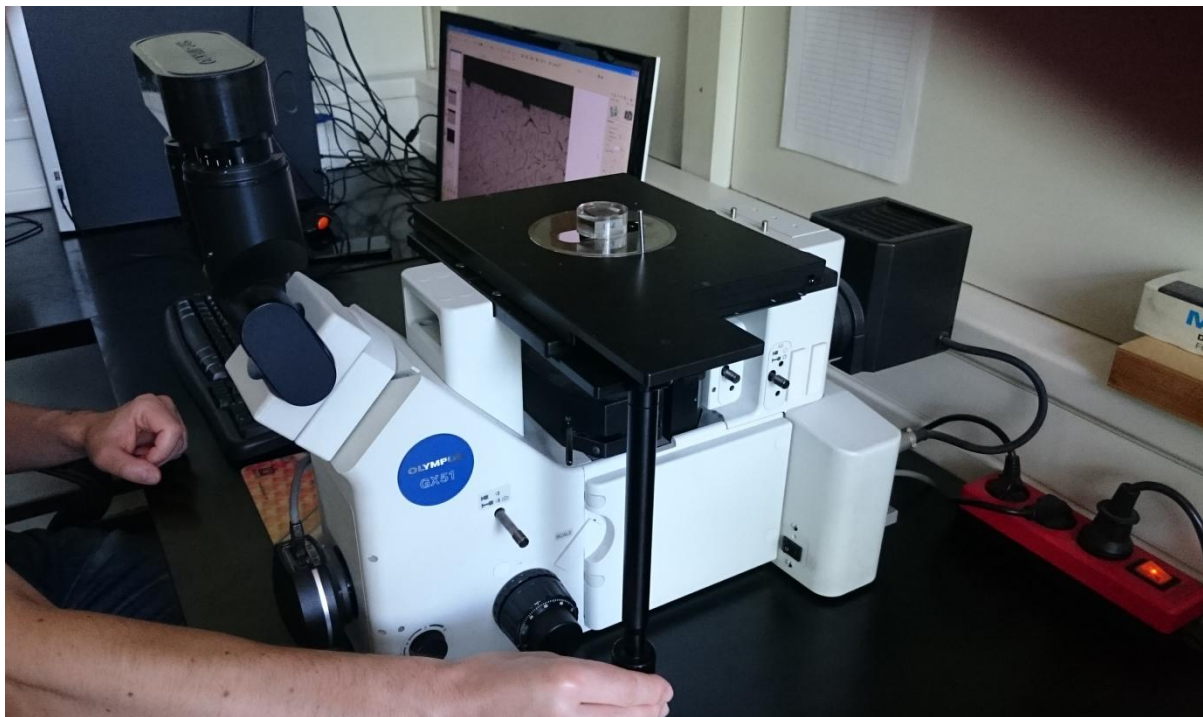
Za određivanje mikrostrukture potrebno je ispitni uzorak nagrismi. Pod nagrizzanjem granice zrna podrazumijeva se takvo nagrizzanje pri kome se nagrizzaju isključivo granice zrna metala ili legura dok se pojedina zrna ne razlikuju po boji. Ovaj efekt može biti prouzrokovan različitim djelovanjem sredstva za nagrizzanje u ovisnosti od orijentacije kristalnih ravnina u odnosu na površinu izbruska. Na granicama zrna često su prisutne metalne i nemetalne nečistoće u vidu debljeg ili tanjeg sloja. Te nečistoće su kemijski manje plemenite od kristalnih zrna. Pri nagrizzanju stvaraju se lokalni elektrokemijski elementi. Najplemenitiji mikrokonstituenti, u ovom slučaju supstance na granicama zrna, se rastvaraju, dok sam kristal ostaje nedirnut. Kristalna zrna su poslije nagrizzanja odvojena jedna od drugih uslijed stvorenih udubljenja.

Za nagrizzanje ispitnog uzorka po rubu i sredini granice zrna se koristi nital kao što je prikazano slikom 54. Nital je rastvor dušične kiseline u alkoholu i to u omjeru 1 cm³ dušične kiseline i 100 cm³ etil-alkohola.



Slika 54. Nagrizzanje pripremka u Nitalu

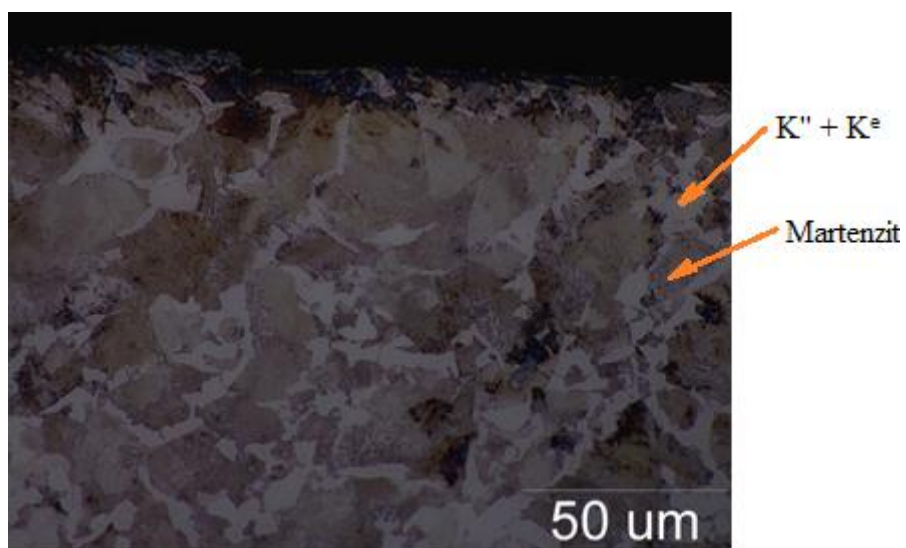
Nakon nagrizivanja ispitnog uzorka provedeno je ispitivanje mikrostrukture na invertnom metalurškom mikroskopu OLYMPUS serije GX 51 (slika)



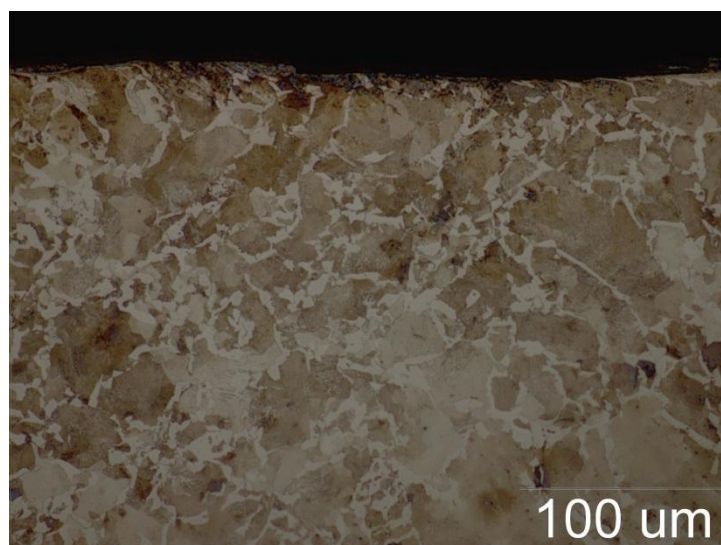
Slika 55. Ispitivanje mikrostrukture na invertnom mikroskopu OLYMPUS serije GX51

Na slici 56 prikazani je mikrostruktura nakon brušenja, poliranja i nagrizivanja, koja je ispitavana na invertnom metalurškom mikroskopu u sredini uzorka.

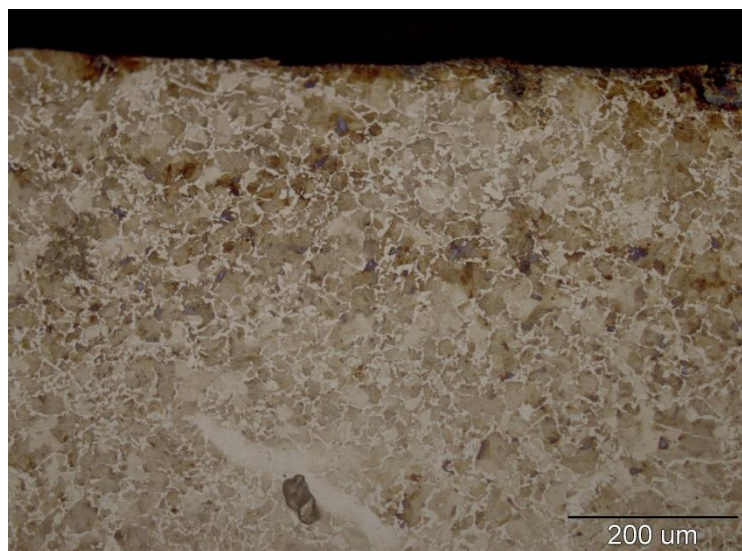
Vidljivo je da prevladava karbid koji je prikazan na slikama 56 do 60, pa prema tome je sam materijal tvrd. Takva mikrostruktura odlikuje se velikom istezljivošću, ali zato pruža veliku otpornost na pritiske i na trošenje.



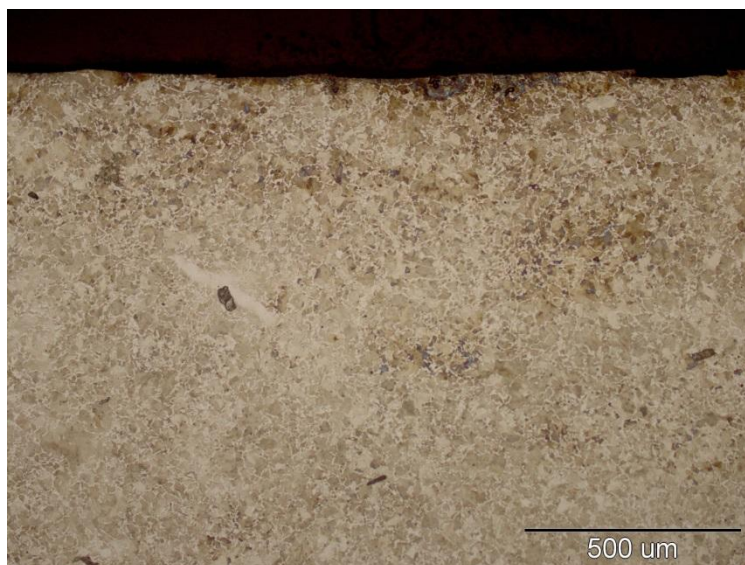
Slika 56. Nagrižen rub, 1000x



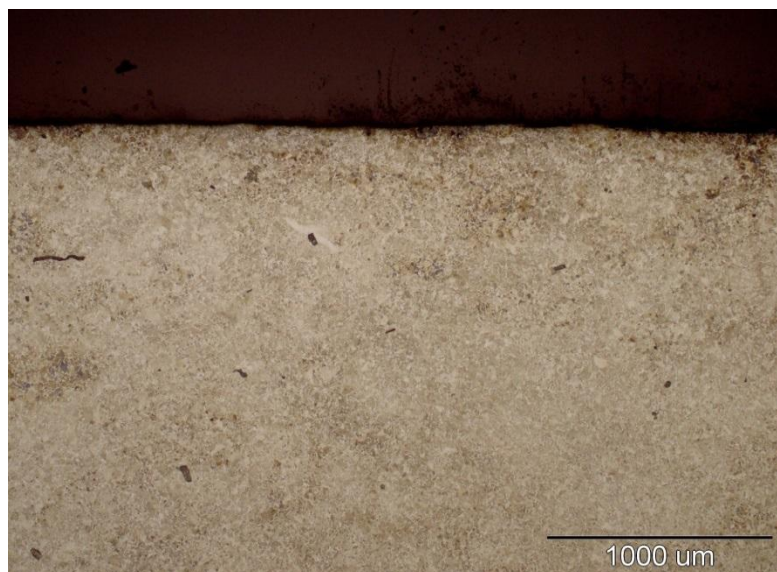
Slika 57. Nagriženo rub, 500x



Slika 58. Nagriženo rub, 200x

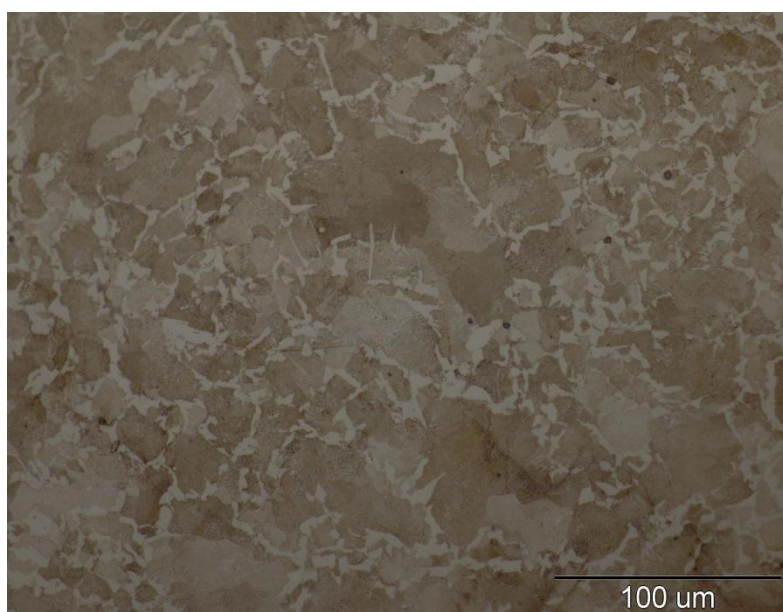


Slika 59. Nagriženo rub, 100x

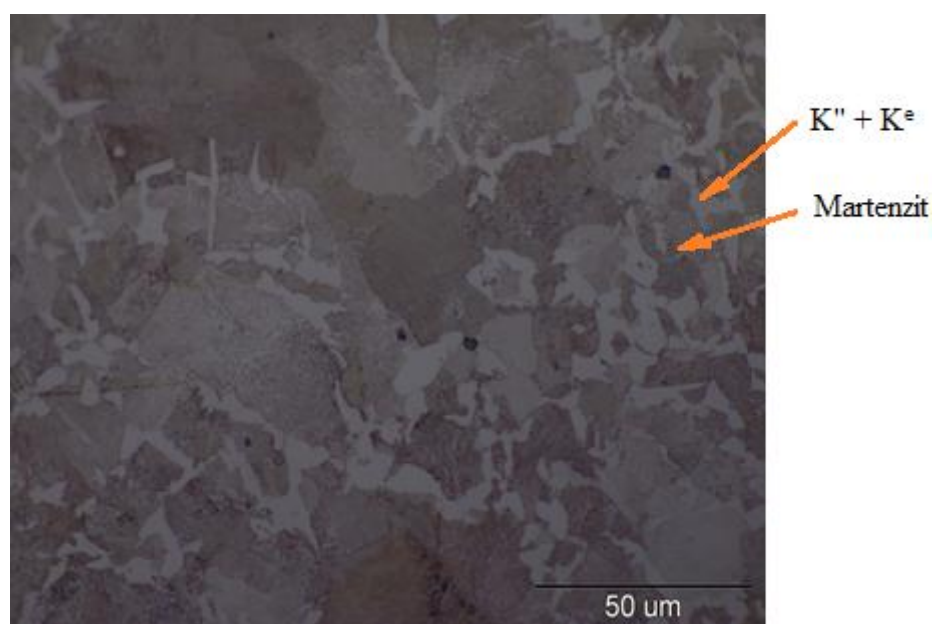


Slika 60. Nagriženo rub, 50x

Vidljivo je da prevladava karbid koji je prikazan na slikama, pa prema tome je sam materijal tvrd. Takva mikrostruktura odlikuje velikom otpornošću na pritiske i na trošenje.



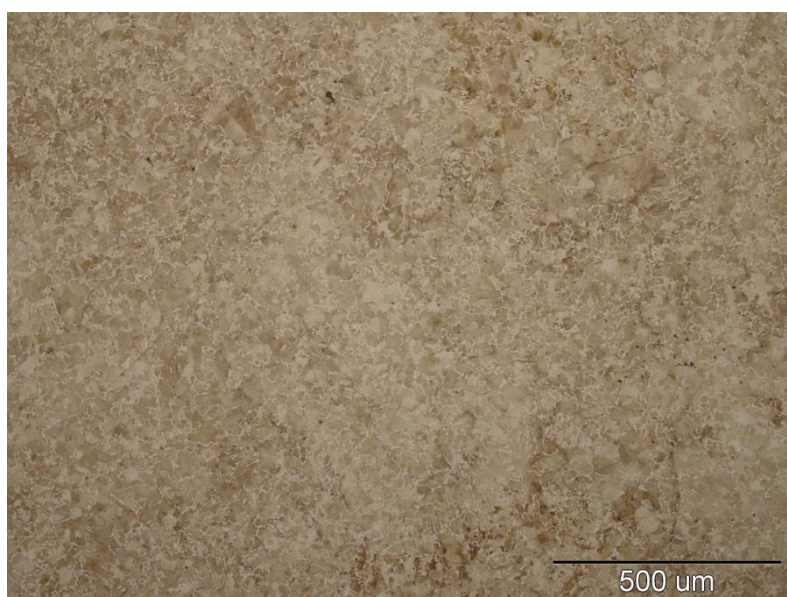
Slika 61. Nagriženo sredina, 1000x



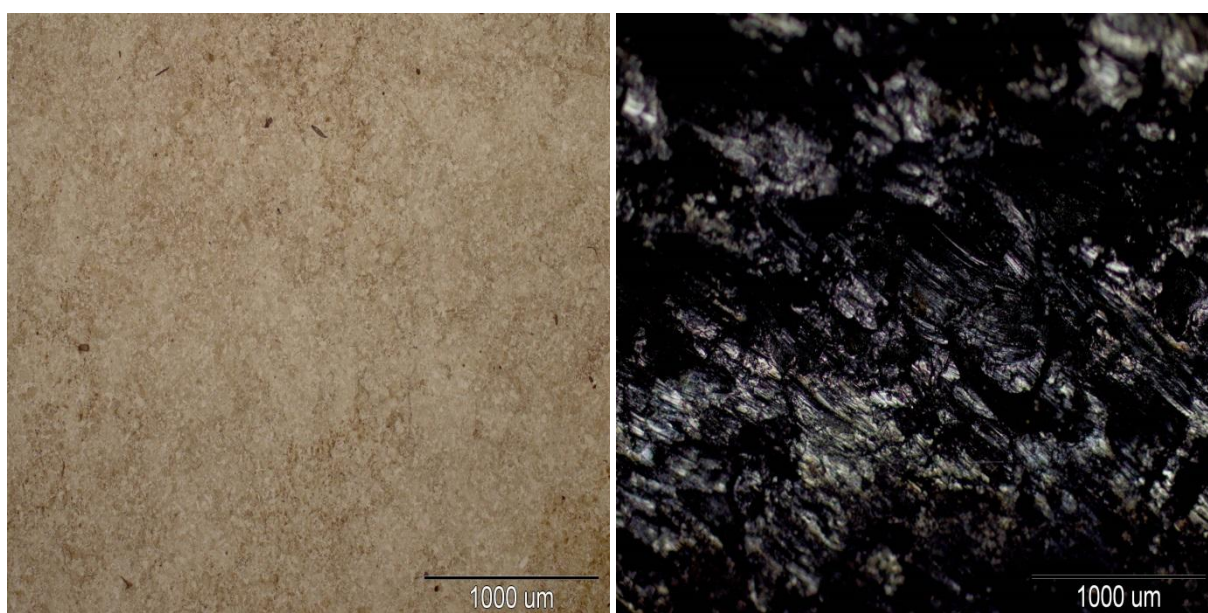
Slika 62. Nagrižena sredina, 500x



Slika 63. Nagriženo sredina, 200x



Slika 64. Nagriženo sredina, 100x



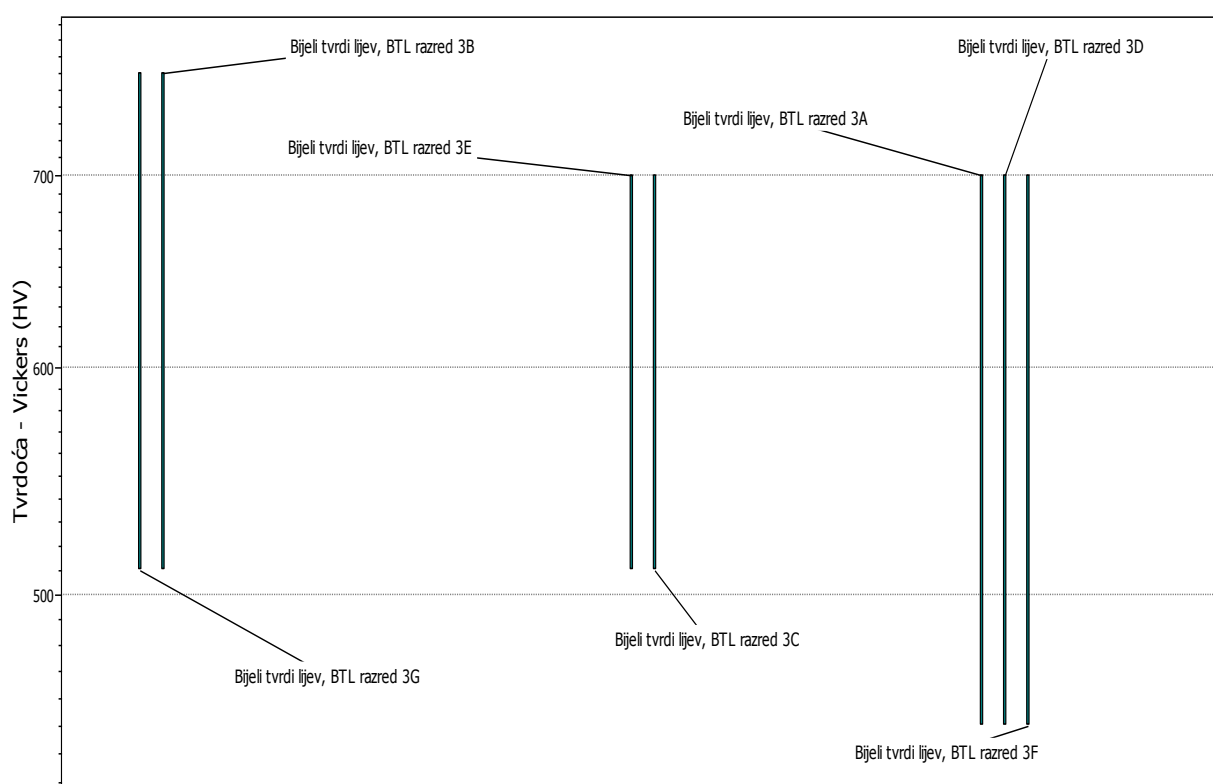
Slika 65. Nagriženo sredina, 50x

Nakon određivanja tvrdoće, kemijskog sastava i mikrostrukture na osnovu dobivenih podataka pristupa određivanju vrste materijala pomoću programskog paketa „CES EduPack 2009“

12.3.6 Određivanje vrste materijala pomoću programskog paketa „CES EduPack 2009“

Za pomoć određivanju materijala korišten je programski paket „CES EduPack 2009“ koji sadrži 2920 metalnih materijala, a postavljanjem izmjerenih vrijednosti u pogledu tvrdoće i kemijskog sastava izbor se suzio na njih 7.

Slikom 66 prikazani su lijevovi koji su ispunili postavljene kriterije kao materijali za monoblok kotača na osnovu predhodno analiziranog kemijskog sastava i srednje izmjerene vrijednosti tvrdoće uzorka.



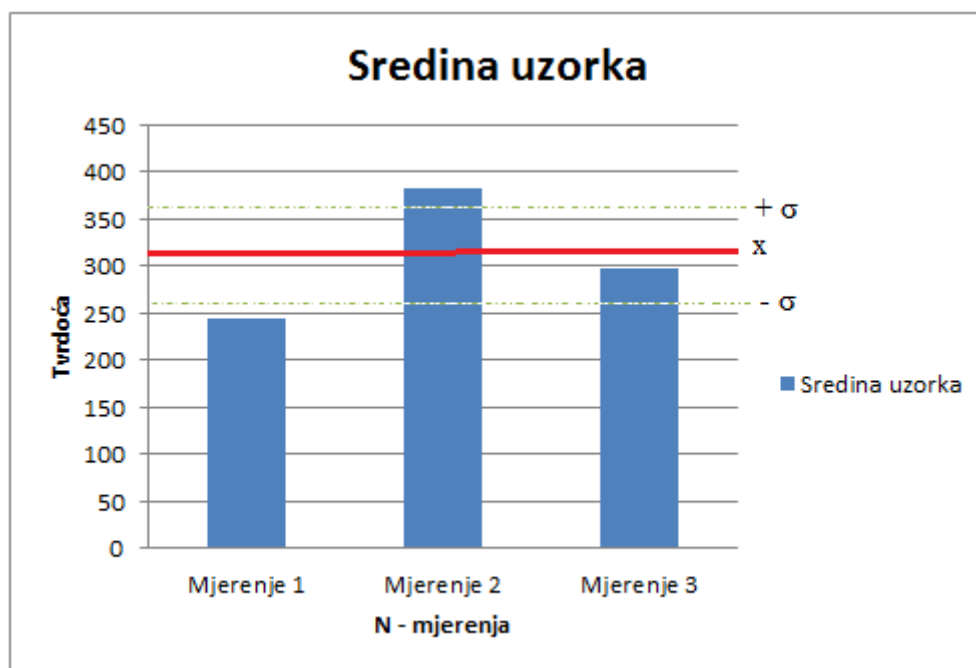
Slika 66. Lijevo koji ispunjavaju postavljene zahtjeve [30].

1. Bijeli tvrdi lijev, **BTL razred 3A**
2. Bijeli tvrdi lijev, **BTL razred 3B**
3. Bijeli tvrdi lijev, **BTL razred 3C**
4. Bijeli tvrdi lijev, **BTL razred 3D**
5. Bijeli tvrdi lijev, **BTL razred 3E**
6. Bijeli tvrdi lijev, **BTL razred 3F**
7. Bijeli tvrdi lijev, **BTL razred 3G**

13. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

Sredina uzorka

Analizom rezultata iz dijagrama vrijednosti tvrdoće (slika 67) je vidljivo da vrijednost tvrdoće po Vickersu ispitivanog materijala u području sredine iznosi $308.33 \pm 57,214$ HV. Kako su predhodno spomenuli u Hercovoj teoriji maksimalna točka naprezanja nije u dodirnoj površini, nego unutar kotača. Rezultati mjerenja su potvrdili Hercovu teoriju međutim vidljivo da se ovdje radi o dosta velikoj vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti. Te nesigurnosti pri ispitivanju tvrdoće ovise o nizu faktora što uključuje nesigurnost ispitivanja, nesigurnost uređaja, te razlučivost uređaja. Navedeni faktori uzrokuju odstupanja pri mjerenju što pridonosi nesigurnosti rezultata ispitivanja.

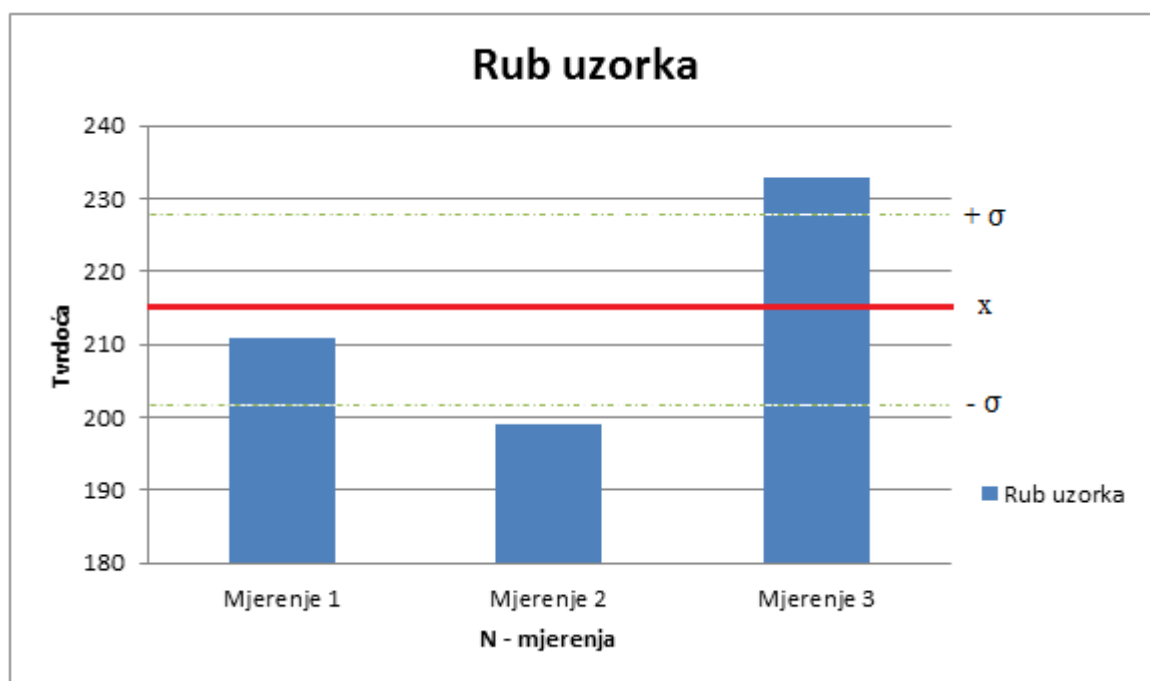


Slika 67. Dijagram analize vrijednosti izmjerene tvrdoće za sredinu uzorka

Rub uzorka

Analizom rezultata iz dijagrama vrijednosti tvrdoće (slika 68) je vidljivo da vrijednost tvrdoće po Vickersu ispitivanog materijala u području ruba iznosi $214.33 \pm 14,079$ HV. Svakako je i ovdje potvrđena Hercova teorija, na osnovu koje je i prilagođena sama toplinska obrada ispitnog uzorka. Posljedica svega toga je i brže trošenje u području samog ruba te kao posljedica toga i sama promjena u strukturi samog materijala.

Svakako je ukupnoj nesigurnosti pridonijelo i slabo iskustvo mjeritelja. Ovdje također treba postaviti pitanje broj potrebnih ispitnih uzoraka kako bi imali veće povjerenja u rezultatu.



Slika 68. Dijagram analize vrijednosti tvrdoće izmjerene za rub uzorka

14. ZAKLJUČAK

Pri eksploataciji svih željezničkih vozila, neizbježan je prirodan proces trošenja vijenca monobloka kotača i površine kotrljanja, koji je grubo rečeno rezultat trenja nastalim između monobloka kotača u dodiru sa tračnicom i papučom za kočenje.

Analiza oštećenja materijala je složena, gdje se utvrđuju komponente oštećenja a potom i tip mehanizma trošenja koji su odgovorni za oštećenje materijala. U svrhu istraživanja i analize površine materijala prije i nakon trošenja koristi se mikroskop te još neke napredne analitičke tehnike.

Kotač iz jednog dijela ili monoblok kotač ima znatne prednosti u odnosu na kotač s obručem zbog čega se sve više primjenjuje. Takvi kotači sigurniji su u eksploataciji jer nema opasnosti od pucanja i spadanja obruča. Mogu se znatno više trošiti i lakši su od kotača s obručem. Stoga se kotači iz jednog dijela redovito primjenjuju na vozilima za velike brzine. Međutim, njihova primjena je skuplja jer se nakon istrošenja mora mijenjati cijeli kotač.

Analizirani oblik trošenja je posljedica kotrljajućeg trenja. Hercova teorija koja je opisana u radu i prepoznata kao bitno načelo u ovom slučaju pokazuje da maksimalna točka naprezanja nije u dodirnoj površini, nego unutar kotača. Iz tog razloga je potrebno odrediti tvrdoću.

Na osnovu toga smo izmjerili tvrdoću za rub i sredinu zorka gdje je potvrđena Hercova teorija, kao posljedica toplinske obrada ispitnog uzorka. Posljedica svega toga je i brže trošenje u području samog ruba te kao rezultat toga i sama promjena u strukturi materijala.

Na osnovu vrijednosti izmjerene tvrdoće, analize kemijskog sastava i mikrostrukture ($K'' + K^e$) ispitnog uzorka, te primjenom programsko paketa „CES EduPack 2009“ određen je materijal ispitnog uzorka (bijeli tvrdi lijev) čija je uporaba kao kotač kod željezničkih vozila što je potvrđeno i stručnom literaturom zbog svoje visoke otpornosti na trošenje i tvrdoće.

15. Literatura

- [1] Borislav G., Analiza trošenja bandaža točkova elektrolokomotiva, Doboj, 2010.
<http://www.odrzavanje.unze.ba/zbornici/2010/025-O10-025.pdf>
- [2] Mehanika i trenje., 8 dio
http://rgn.hr/~lfrgic/nids_lfrgic/PDF_Print_Mehanika_I_N/PDF_M_I/8_Trenje_N_N.pdf
- [3] Vera G., Sanja Lučić Blagojević., Mirela Leskovac., Zrinaka Buhin., Analiza Inženjerstvo površina, Zagreb, 2013.
https://www.fkit.unizg.hr/download/repository/TRIBOLOGIJA_20132014%5B1%5D.pdf
- [4] <https://www.scribd.com/doc/228269950/01TrenjeTrosenjePodmazivanje>
- [5] Gerhard Friedrich Dose., Triebwerke und Verbindungsteile Formeln, Erläuterungen und Berechnungen, Laudenbach.
<http://www.hexagon.de/dose/praxis.pdf>
- [6] Žarko D., Sumina D., Elektromotorni pogoni-predavanja, Zagreb, 2013
- [7] Načini ostvarivanja gibanja transportnih sredstava,
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved>
- [8] Vera K., Domagoj V., Inženjerstvo površina, Zagreb, 2012
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved>
- [9] Prometna zona., Kolni slogovi.,
http://www.prometna-zona.com/zeljeznicki-tehnologija-005kolni_slogovi.php
- [10] Bonatrans - Railway Wheels and Wheelsets for all Railway Applications
<http://www.railway-technology.com/contractors/bogies/bonatrans/bonatrans3.html>
- [11] Bochumer Verein., Gummigefederte Räder,
http://www.bochumer-verein.de/de-DE/produkte/gummigefederte_raeder/Seiten/default.aspx
- [12] Michael Uhlig., ESR 0330 Wheel defect manual, Version 1.2, 2013
http://www.bochumer-verein.de/de-DE/produkte/gummigefederte_raeder/Seiten/default.aspx
- [13] <https://de.wikipedia.org/wiki/Spurkranz>
- [14] Michael Uhlig., ESR 0330 Wheel defect manual, Version 1.2, 2013
http://www.bochumer-verein.de/de-DE/produkte/gummigefederte_raeder/Seiten/default.aspx
- [15] Ministarstvo mora, prometa i infrastrukture., Pravilnik o tehničkim uvjetima za sigurnost željezničkog prometa kojima moraju udovoljiti željeznička vozila, 2013
http://www.vlakovi.com/wp-content/uploads/2013/01/Pravilnik_o_TU_zelj_vozila.pdf

- [16] Wärmebehandlung von Eisenbahnrädern
<http://www.werkstoff-blog.de/blog2/dr-ingo-poschmann/start58/wie-funktioniert-eigentlich-%E2%80%A6-die-w%C3%A4rmebehandlung-von-eisenbahnr%C3%A4dern/>
- [17] Veljko V., Tehničko-tehnološki i ekonomski pokazatelji opravdanosti navarivanja venca monoblok točkova kvaliteta ER7 željezničkih vozila za brzine kretanja do 120 km/h, Novi Sad, 2013
[http://www.cris.uns.ac.rs/DownloadFileServlet/Disertacija139177598734513.pdf?controlNumber=\(BISIS\)85403&fileName=139177598734513.pdf&id=1312](http://www.cris.uns.ac.rs/DownloadFileServlet/Disertacija139177598734513.pdf?controlNumber=(BISIS)85403&fileName=139177598734513.pdf&id=1312)
- [18] Radu Popovici., Friction in Wheel - Rail Contacts, Enschede, The Netherlands, 2010
http://www.utwente.nl/ctw/tr/Research/Publications/PhDTheses/Thesis_Popovici.pdf
- [19] Wikipedia., Spurweite.
[https://de.wikipedia.org/wiki/Spurweite_\(Bahn\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Spurweite_(Bahn))
- [20] UIC CODE 510-2., Trailing stock: wheels and wheelsets. Conditions concerning the use of wheels of various diameters, The Netherlands, 2004
http://www.utwente.nl/ctw/tr/Research/Publications/PhDTheses/Thesis_Popovici.pdf
- [21] <http://www.kos.cz/index.php?id=specialni-midla>
- [22] Franc M., Ivušić V., Ponašanje materijala u eksploataciji , Prognoza vijeka trajanja konstrukcija-autorizirana predavanja, Zagreb, 2014.
- [23] Beka World., FluiLub Spray Lubrication Systems
<http://www.bekaworld.com/en/produkte/beka-fluilub.php>
- [24] Hegenscheidt- MFD GmbH & Co.KG., Pogonske upute za portalni tokarski stroj za kolne slogove.
- [25] Alar T.: Analiza utjecajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera, Doktorska disertacija, Zagreb, 2008
https://www.fsb.unizg.hr/atantis/upload/newsboard/02_06_2008_9070_DOKTORAT_Alar.pdf
- [26] L. Ćurković, M. Lalić, S. Šolić: Analysis of indentation size effect on hardness of alumina ceramics using different models
- [27] Državni zavod za mjeriteljstvo: Metalni materijali, Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu, Narodne novine, Zagreb, 2000
- [28] Vorax., Postupci mjerenja tvrdoće.
http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/mjer_tvr_hr.html
- [29] Nino Grgić: Korozijska stabilnost zubne keramike
<https://www.scribd.com/doc/88487395/472491-DKorozijska-Stabilnost-Zubne-Keramike>
- [30] Program „CES EduPack 2009“

